



Machbarkeitsstudie und Umstellungskonzeption zur Elektrifizierung der Busflotte der Stadtwerke Rüsselsheim

Abschlussbericht

Kunde: Stadtwerke Rüsselsheim GmbH
 Walter-Flex-Straße 74
 65428 Rüsselsheim am Main



Autoren: Dr. Mareev, Ivan
 Dr. Rogge, Matthias

Datum: 12. Mai 2023

Inhalt

| | |
|--|--------|
| Executive Summary | - 2 - |
| Studieninhalte | - 6 - |
| 1. Grundlagenermittlung und Aufnahme der lokalen Situation (AP 1) | - 7 - |
| 1.1 Technische Grundlagen | - 7 - |
| 1.2 Erfassung der Betriebsdaten und Darlegung der betrieblichen Situation | - 17 - |
| 1.3 Evaluierung potenzieller Energieversorgungsorte | - 21 - |
| 2. Technische und betriebliche Analyse (AP 2) | - 25 - |
| 2.1 Methodik | - 25 - |
| 2.2 Technische Machbarkeitsprüfung ohne betriebliche Anpassungen | - 27 - |
| 2.3 Technische und betriebliche Analyse mit betrieblichen Anpassungen | - 28 - |
| 3. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Quantifizierung der Umweltwirkung (AP 3) | - 33 - |
| 3.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung | - 33 - |
| 3.2 Quantifizierung der Umweltwirkung | - 42 - |
| 3.3 Fazit und Technologieempfehlung | - 46 - |
| 4. Umstellungsplanung | - 48 - |
| 4.1 Anforderungen und Rahmenbedingungen | - 48 - |
| 4.2 Handlungsleitfaden Austausch der Busse | - 48 - |
| 4.3 Ladeinfrastruktur im Betriebshof | - 50 - |
| 4.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Umweltnutzen | - 52 - |
| Literaturverzeichnis | - 55 - |
| Anhang I | - 56 - |
| Anhang II | - 57 - |
| Anhang III | - 58 - |

Executive Summary

Die vorliegende Machbarkeitsstudie untersucht und bewertet das gesamte Busnetz der Stadtwerke Rüsselsheim GmbH (nachfolgend: „SWR“) hinsichtlich einer Umstellung auf den Elektrobuseinsatz. Das Ziel der Studie war es, eine Machbarkeitsanalyse für die Umstellung der Dieselbusflotte der SWR auf Elektrobusse durchzuführen und ein Umstellungskonzept zu erarbeiten. Folgende Elektrobustypen wurden in der Studie betrachtet: Batteriebusse mit Ladung im Depot und an den Endstellen, Brennstoffzellenhybridbusse und Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range Extender (BZ-REX).

Grundlagenermittlung und Aufnahme der lokalen Situation

Grundlage für die Studie bildeten die Betriebsdaten des Liniennetzes der SWR, die im Laufe dieser Studie aufbereitet und analysiert wurden. Diese beinhalten 21 Linien, davon 10 Linien im Schülerverkehr. Die betrachteten Gefäßgrößen waren Solo- und Gelenkbusse, betrieben vom Standort des bestehenden Betriebshofs der SWR. Anhand der höchsten Nutzfahrleistung wurde die anspruchsvollste Tagesart ausgewählt, die für die Systemauslegung relevant ist.

Zur Aufnahme der lokalen Situation wurde der Betriebshof anhand einer Betriebshofbegehung und der von der SWR zur Verfügung gestellten Informationen analysiert. Die aktuelle Betriebshofstruktur sowie die aktuellen Planungen wurden aufgenommen und für die vorliegende Studie aufbereitet. Zum anderen wurden die Endstellen der in dieser Studie betrachteten Linien auf ihre Eignung als Ladeorte untersucht. Aufgrund der Linienstruktur wurde lediglich die Endstelle „Rüsselsheim Bahnhof“ als relevant für einen potenziellen Ladeort bewertet.

Um die am Markt verfügbaren bzw. von den Herstellern angekündigten Elektrobusse in der Studie abzubilden, wurden Referenzfahrzeuge für die betrachteten Technologien definiert. Für Batteriebusse wurden dabei verschiedene Fahrzeugkonfigurationen mit Variationen der Batteriekapazitäten festgelegt; für Solobusse 375 kWh, 475 kWh und 575 kWh und für Gelenkbusse 500 kWh und 625 kWh. Als Betriebskonzepte für Batteriebusse wurden sowohl Depotladung mit 150 kW Standardladung und 300 kW Schnellladung als auch Endstellenladung mit 300 kW Ladeleistung untersucht.

Ferner wurden Batteriebusse mit zwei verschiedenen Heizsystem-Varianten untersucht. Dabei handelte es sich zum einen um eine rein elektrische, durch die Batterie gespeiste Heizung und zum anderen um eine Hybridheizung mit Brennstoffzusatzheizung. Insbesondere im „Worst Case“, dem für die Systemauslegung relevanten Fall, also bei tiefen Temperaturen, führen diese beiden Heizstrategien zu unterschiedlichen Energiebedarfen und haben somit Einfluss auf die betriebliche Effizienz.

Technische und betriebliche Analyse

Für jede Fahrzeugkonfiguration wurden mittels „energiebasierter“ Umlaufplanung – d.h. unter Berücksichtigung des durch Simulationen ermittelten Energie- und Kraftstoffverbrauchs und der verfügbaren Batterie- bzw. Tankkapazität sowie der jeweils benötigten Ladephasen – der Fahrzeugbedarf (Fahrplanbedarf), die Leerkilometer, die Fahrzeit und die nötige Ladeinfrastruktur ermittelt. Die Verplanung der jeweils selben Fahrleistung für Dieselbusse diente dabei als Referenz für den Vergleich.

Die Ergebnisse der technisch-betrieblichen Analyse zeigten, dass der Einsatz von Batteriebusen mit einer Hybridheizung den Betrieb ohne Fahrzeugmehrbedarf gegenüber der Diesel-Referenz ermöglicht. Sollen Batteriebusse mit vollelektrischer Heizung eingesetzt werden, dann empfiehlt es sich die Schnellladung im Depot oder eine größere Batteriekapazität zu nutzen, um den Fahrzeugmehrbedarf zu reduzieren. Brennstoffzellenhybridbusse und Batteriebusse mit BZ-REX zeigen ebenfalls keinen Fahrzeugmehrbedarf auf.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Quantifizierung der Umweltwirkung

Aufbauend auf den Ergebnissen der technischen und betrieblichen Analyse – insbesondere der Fahrzeuganzahl, Leerkilometer, Fahrzeit sowie des Infrastrukturbedarfs – wurde für sämtliche Fahrzeugkonfigurationen und Szenarien eine Wirtschaftlichkeitsrechnung (Total Cost of Ownership, TCO) durchgeführt. Zudem wurden die Umweltauswirkungen in Form von Emissionen – CO₂-Äquivalente, Stickoxide NO_x und Feinstaub PM – quantifiziert. Batteriebusse mit kleinerer bis moderater Batterie (375 kWh bei Solobussen und 500 kWh bei Gelenkbussen) sowie mit Hybridheizung und 150 kW Standardladung im Depot stellen die wirtschaftlichste Lösung dar. Aufgrund geringerer Anforderungen bei der Systemauslegung mit Hybridheizung sind die entsprechenden Buskonfigurationen kostengünstiger als jene mit vollelektrischer Heizung. So sind die Gesamtkosten der Buskonzepte mit Hybridheizung ca. 6 % (bei Gelenkbussen) bis 8 % (bei Solobussen) günstiger als Konzepte mit vollelektrischer Heizung.

Der Einsatz von Brennstoffzellenhybrid- und Batteriebusen mit BZ-REX führt – u.a. aufgrund der Wasserstoffkosten – zu deutlichen Mehrkosten. Bezogen auf die wirtschaftlichste Lösung der Batteriebusse betragen die Mehrkosten für Brennstoffzellenhybridbusse über 70 % und für Batteriebusse mit BZ-REX über 40 %.

In Verbindung mit bilanziell klimaneutralem Strom aus erneuerbaren Energien ist durch den Batteriebusseinsatz eine deutliche Reduktion der CO₂-Emissionen um ca. 88 % (oder mehr) möglich. Das Gleiche gilt für den Einsatz von klimaneutralem „grünem Wasserstoff“. Bei Bustypen mit Hybridheizung entstehen durch den Einsatz des Brennstoffzusatzheizers zwar betriebliche Emissionen. Weil die Brennstoffzusatzheizung jedoch nur bei tiefen Temperaturen eingeschaltet wird, bleiben die CO₂-Emissionen von Bustypen mit Hybridheizung ebenfalls niedrig. Die NO_x-Emissionen reduzieren sich beim Einsatz von allen untersuchten Elektrobustypen um mehr als 94 %, die PM-Emissionen um mehr als 80 %.

Basierend auf diesen Ergebnissen erweisen sich Batteriebusse mit Hybridheizung und Depotladung als empfehlenswertes Konzept. Aufgrund geringerer TCO erscheinen bzgl. der Batteriekapazitäten mind. 375 kWh für Solobusse und 500 kWh für Gelenkbusse empfehlenswert. Der Betrieb mit Hybridheizung ermöglicht es, die Batteriebusse mit diesen Batteriekapazitäten ohne Fahrzeugmehrbedarf einzusetzen. Gleichzeitig ist auch beim Einsatz einer Hybridheizung ein hohes Einsparpotential bzgl. der CO₂e-, NO_x- und PM-Emissionen vorhanden. Als Ladeleistung erweist sich, sowohl für Solo- als auch für Gelenkbusse, die Standardladung mit 150 kW als ausreichend. Diese Ladeleistung kann über Steckerladung realisiert werden.

Umstellungsplanung

Auf Grundlage der bisherigen Studienergebnisse und der daraus abgeleiteten Technologieempfehlung wurde in diesem Arbeitspaket eine Umstellungsplanung für die Busflotte der SWR erarbeitet. Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen der SWR wurde ein Handlungsleitfaden für den Austausch der Busflotte und für den Aufbau der Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof erstellt. Mit dem empfohlenen Buskonzept können die Dieselbusse ohne einen entstehenden Fahrzeugmehrbedarf durch Batteriebusse ersetzt werden, sodass die Summe der Fahrzeuge nach vollständigem Austausch der Flotte unverändert bei 25 Fahrzeugen bleibt. Ein empfehlenswerter Zeitpunkt für die Inbetriebnahme der ersten Batteriebusse liegt im Jahr 2025. Bis zu diesem Zeitpunkt ist eine ca. 2-jährige Phase zur Vorbereitung des Betriebsstarts der ersten Batteriebusse einzurechnen, welche die Fördermittelakquise, die Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturausschreibungen sowie deren Aufbau und Inbetriebnahme enthält. Der Handlungsleitfaden zum Austausch der Flotte sieht vor, nahezu jährlich max. 2 Dieselbusse durch Batteriebusse zu ersetzen. So werden die Batteriebusse in kleineren Schritten in den Betrieb eingeführt und Erfahrungen zum Thema Elektromobilität können sukzessiv aufgebaut werden. Die vollständige Elektrifizierung der Flotte erfolgt somit bis zum Jahr 2037.

Der Handlungsleitfaden zum Aufbau der Infrastruktur besteht aus zwei Ausbaustufen. Es wird empfohlen, dass für jeden Batteriebus ein Ladepunkt mit einer Ladeleistung von mind. 75 kW errichtet wird. So kann der Bus in der Abstellung nachgeladen werden, ohne ihn umparken zu müssen. Ferner kann der Ladepunkt auch zur Vorkonditionierung des Busses und für das Balancing der Batterie genutzt werden. Der Handlungsleitfaden sieht die erste umfassende Elektrifizierung des Betriebshofs bis zum Jahr 2025 vor, wenn die ersten Batteriebusse in Betrieb genommen werden sollen. Dazu sollen 5 Ladegeräte à 150 kW Ladeleistung mit jeweils 2 Steckern für insgesamt 10 Ladepunkte aufgebaut werden. Ferner sind für die Stromversorgung die Installation eines Transformatorhauses mit 1.000 kW, die Vorbereitung eines zweiten 1.000 kW Transformatorhauses sowie die Errichtung eines 2.000 kW Netzanschlusses empfehlenswert. Im zweiten Ausbauschnitt zum Jahr 2030 werden 8 weitere Ladegeräte à 150 kW Ladeleistung zur Versorgung von 16 Ladepunkten sowie ein weiteres Transformatorhaus mit 1.000 kW errichtet. Nach vollständigem Ausbau der Ladeinfrastruktur stehen somit 13 Ladegeräte zur Verfügung, die 26 Ladepunkte versorgen.

Nach dem erstellten Handlungsleitfaden wurden eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und die Quantifizierung des Umweltnutzens der Umstellung auf Batteriebusse durchgeführt. Zur Inbetriebnahme der ersten Batteriebusse im Jahr 2025 wurden die notwendigen Investitionen, bestehend aus Kosten für Fahrzeuge, Ladeinfrastruktur und die Ertüchtigung der Werkstatt, zu insgesamt ca. 2,7 Mio. € berechnet. Hierbei machen die Investitionen in die ersten beiden Batterie-Gelenkbusse mit ca. 1,46 Mio. € den größten Kostenanteil aus. Die Summe der Investitionen zum Start der Batteriebusse kann bei Berücksichtigung entsprechender Fördermöglichkeiten um bis zu 40 % auf ca. 1,67 Mio. € reduziert werden.

Die jährlichen Mehrkosten der Umstellung auf Batteriebusse gegenüber dem Weiterbetrieb mit Dieselnissen liegen im Bereich von 6 % bis 19 % der Gesamtkosten. Hierbei wurden sowohl Kapital- als auch Betriebskosten der Batterie- und Dieselnisse berücksichtigt. Durch den stetigen Austausch der Dieselnisse durch Batteriebusse, entsprechend dem Handlungsleitfaden, steigen die jährlichen Mehrkosten über den Zeitraum der Umstellung.

Den Mehrkosten der Umstellung auf Batteriebusse steht eine positive Umweltwirkung gegenüber. Durch die schrittweise Einführung der Batteriebusse, entsprechend dem Handlungsleitfaden, und der Annahme des Betriebs mit bilanziell klimaneutralem Strom folgend, sinken die CO_{2e}-Emissionen der Flotte kontinuierlich. Nach vollständiger Umstellung im Jahr 2037 reduzieren sich die CO_{2e}-Emissionen um ca. 90 % im Vergleich zur Diesel-Referenz.

Studieninhalte

Die durchgeführte Machbarkeitsstudie untersucht und bewertet das gesamte Busnetz der SWR hinsichtlich einer Umstellung auf den Elektrobuseinsatz¹. Die Untersuchung gliederte sich in vier Arbeitspakete, welche in Abbildung 1 dargestellt sind.

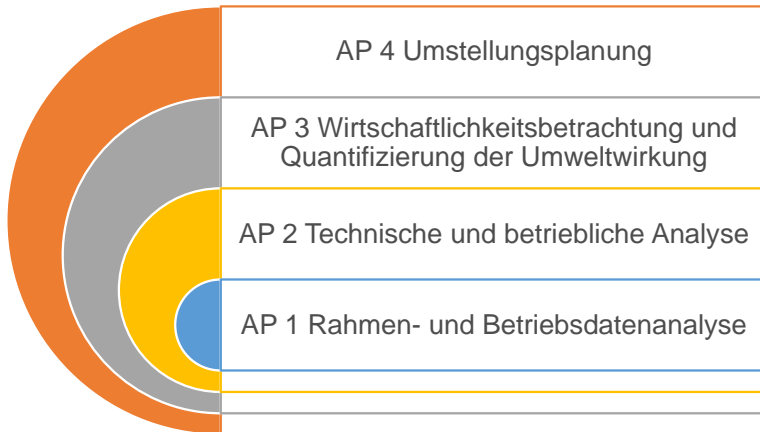


Abbildung 1: Übersicht über die Struktur der Studie in 4 Arbeitspaketen

Zunächst wurden die konkrete betriebliche Situation erfasst und potentielle Orte für die Errichtung von Infrastruktur bewertet (AP 1). Als technologische Optionen wurden Batteriebusse und Brennstoffzellenbusse² betrachtet. Für jede Technologie wurden die technische Machbarkeit sowie die betrieblichen Konsequenzen ermittelt (AP 2). Die aus einer Umstellung resultierenden finanziellen Auswirkungen und Potenziale der Emissionsreduktion wurden anschließend dem Referenzsystem Dieselbus Euro VI gegenübergestellt (AP 3). In einer Kosten-Nutzen-Analyse wurden auf dieser Basis Technologieempfehlungen abgeleitet, die in die Erarbeitung der Umstellungsplanung eingeflossen sind (AP 4). Der vorliegende Bericht folgt diesem Aufbau.

¹ Unter dem Begriff „Elektrobus“ werden in dieser Studie Batteriebusse und Brennstoffzellenbusse gefasst.

² Der Begriff „Brennstoffzellenbus“ dient hier als Überbegriff für Brennstoffzellenhybridbusse und Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender (vgl. Kapitel 1.1.1.2).

1. Grundlagenermittlung und Aufnahme der lokalen Situation (AP 1)

AP 1 diente der Erarbeitung von Grundlagen für die vorliegende Studie. Dazu wurde eine Rahmen- und Betriebsdatenanalyse durchgeführt. Zuerst wurde der Überblick über den aktuellen Stand der Technik bei Elektrobussen und ihren Komponenten sowie über die Marktsituation gegeben (Kapitel 1.1). Um die am Markt verfügbaren bzw. von den Herstellern angekündigten Elektrobusse in der Studie abzubilden, wurden Referenzfahrzeuge für die betrachteten Technologien definiert.

Zur Abbildung der betrieblichen Situation wurden die Betriebsdaten erfasst und die betriebliche Situation analysiert (Kapitel 1.2). Ferner wurden bei der Grundlagenermittlung in AP 1 potenzielle Energieversorgungsstellen untersucht. Zuerst wurde die aktuelle Situation am Betriebshof der SWR erfasst und für die Verwendung im weiteren Verlauf der Studie aufbereitet (Kapitel 1.3.1). Für die Nachladung der Batteriebusse außerhalb des Betriebshofs wurden Endstellen auf ihre Eignung als potenzielle Ladeorte für Endstellenladung untersucht (Kapitel 1.3.2).

Somit wurde eine umfassende Grundlagenermittlung für den weiteren Verlauf dieser Studie durchgeführt. Auf die einzelnen Themen wird in den folgenden Unterkapiteln eingegangen.

1.1 Technische Grundlagen

Im Folgenden werden die technischen Grundlagen der alternativen Fahrzeugtechnologien, die innerhalb der Studie analysiert wurden, sowie der für den Elektrobusbetrieb notwendigen Infrastruktur beschrieben. Insgesamt wurden Batteriebusse mit Depot- sowie Gelegenheitsladung, Brennstoffzellenhybridbusse und Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX) als Fahrzeugtechnologien analysiert.

1.1.1 Fahrzeugtechnologien und deren betriebliche Eigenschaften

Die Mehrheit der Elektrobushersteller verfolgt einen modularen Ansatz, bei dem die Fahrzeuge in unterschiedlichen Ausprägungen konfiguriert werden können. Dies umfasst unterschiedliche Batteriegrößen, aber auch verschiedene Ladeleistungen und Koppelsysteme. Anhand der am Markt verfügbaren Fahrzeuge wurden Referenzbustypen hergeleitet, die in Abbildung 2 dargestellt sind.

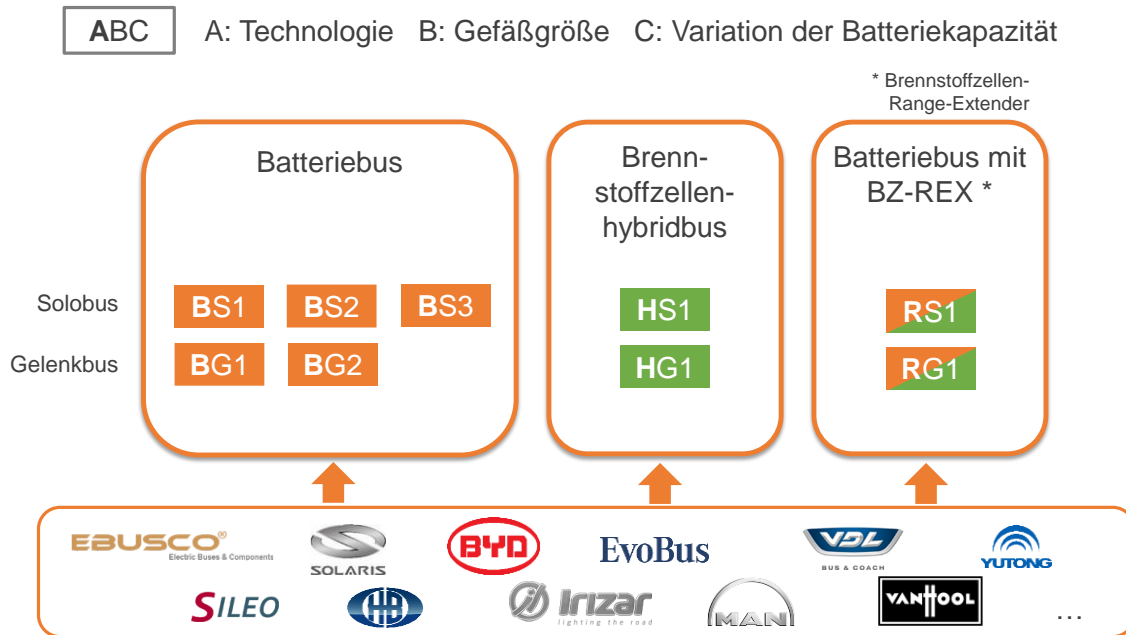


Abbildung 2: Übersicht der hier betrachteten Fahrzeugtypen

1.1.1.1 Batteriebusse

Batteriebusse zeichnen sich dadurch aus, dass die gesamte Traktionsenergie und - je nach Klimatisierungskonzept (vgl. Kapitel 1.1.2) - die Energie für die Nebenverbraucher des Fahrzeugs aus einem Batteriespeichersystem bezogen wird. Dementsprechend beeinflusst die Kapazität dieses Speichers unmittelbar die Reichweite und damit die technische Machbarkeit bzw. die betriebliche Auslegung des Fahrzeugs. Um diesen wesentlichen Einfluss zu berücksichtigen, wurden für jede Gefäßgröße bis zu drei unterschiedlich große Batteriekapazitäten angenommen. Dabei bildet die Wahl der Batteriegrößen die zum Zeitpunkt der Studie am Markt verfügbaren Systeme ab.

Insbesondere im Bereich der Solobusse sind viele Hersteller mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten auf dem Markt vertreten. Die Übersicht des Marktangebots zeigt die enorme Bandbreite an verfügbaren Batteriegrößen (Abbildung 3). Als repräsentative Werte wurden die Batteriekapazitäten von 375 kWh (BS1) und 475 kWh (BS2) gewählt. Somit können mehrere Hersteller zum potenziellen Bieterkreis gehören und eine wettbewerbliche Vergabe sichergestellt werden. Um eine mögliche Weiterentwicklung der Batteriekapazitäten auf dem Markt zu berücksichtigen, wurde ferner die Batteriekapazität von 575 kWh (BS3) ausgewählt.

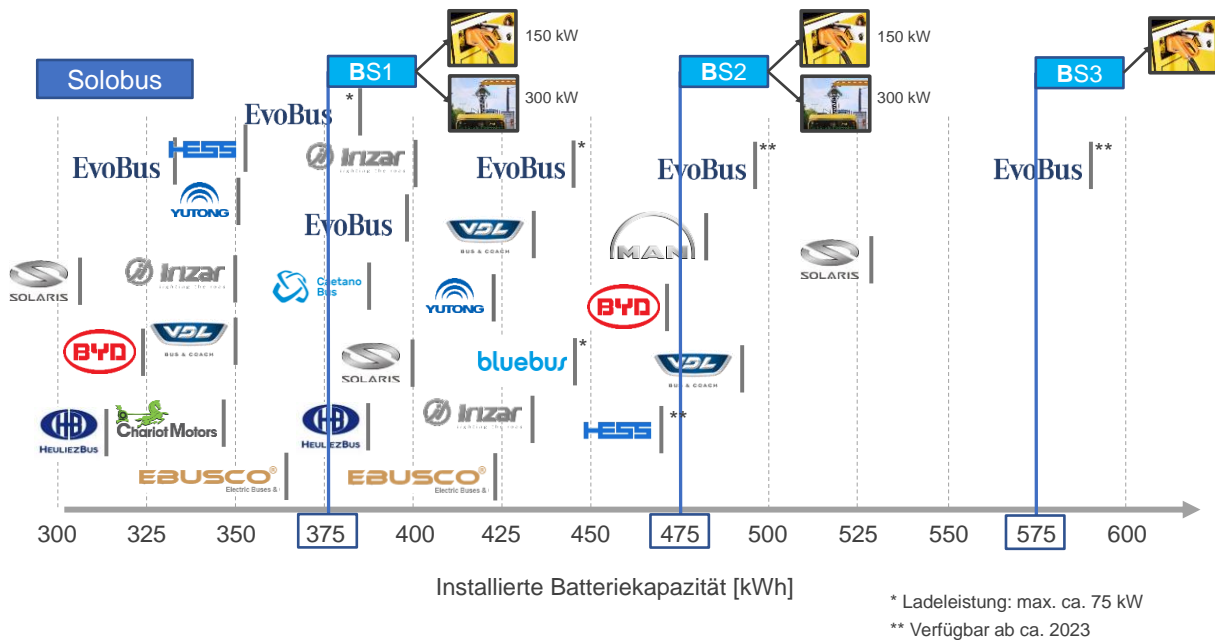


Abbildung 3: Batteriekapazitäten der Referenz-Batterie-Solobusse im Kontext des aktuellen Marktangebots

Im Bereich der Gelenkbusse ist das aktuelle Marktangebot etwas geringer, aber dennoch ausreichend hoch, um bei den gewählten Batteriekapazitäten (BG1: 500 kWh, BG2: 625 kWh) nicht von einem Hersteller abhängig zu sein. Abbildung 4 zeigt die gewählten Batteriekapazitäten im Kontext des aktuellen Marktangebots.

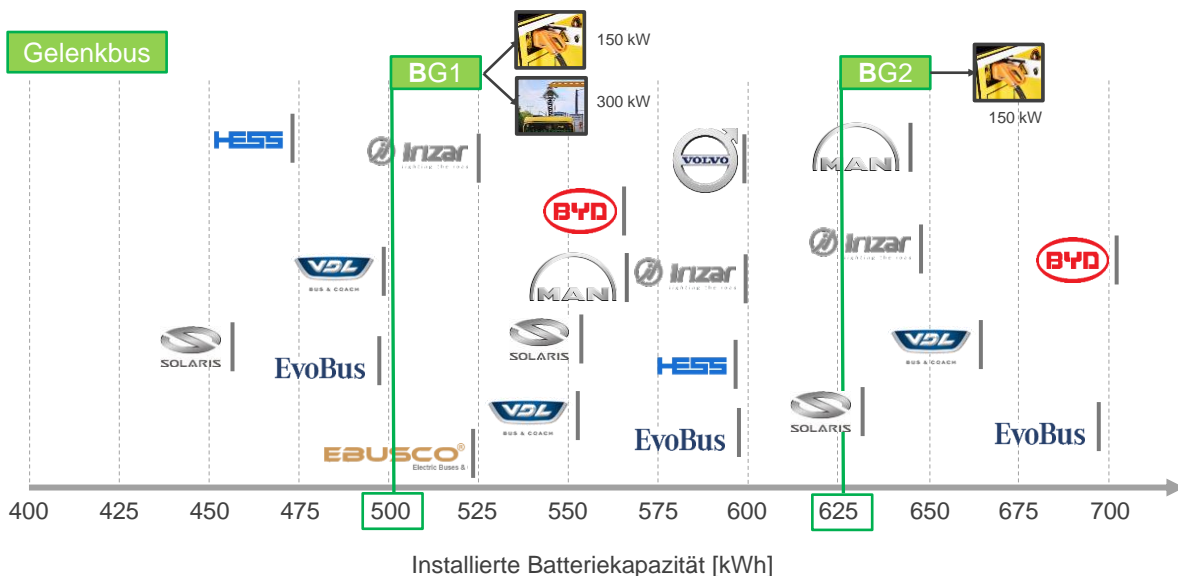


Abbildung 4: Batteriekapazitäten der Referenz-Batterie-Gelenkbusse im Kontext des aktuellen Marktangebots

Aufgrund der begrenzten Reichweite von Batteriebussen ist ein Betriebsmodell identisch zum Dieselmotortrieb häufig nicht möglich. Trotz des stetigen Fortschritts in der Batterieentwicklung reichen die Energiekapazitäten oft nicht aus, um den täglichen Umlaufplan eines Dieselmotortriebes zu befahren, wodurch ein zwischenzeitliches Nachladen erforderlich wird. Hier gibt es zwei mögliche Ladekonzepte, die weiterhin die technische Ausgestaltung der Fahrzeuge und

insbesondere die Wahl des Batteriesystems (Hochenergie oder Hochleistung) bedingen: Depotladung und Gelegenheitsladung.

Als „Depotladung“ bezeichnet man das ausschließliche Nachladen im Betriebshof. Die Nachladung erfolgt größtenteils über Nacht, aber falls notwendig auch während der Betriebszeiten. Dieses Konzept sieht üblicherweise keine Installation von Ladeinfrastruktur an Haltestellen oder sonstigen öffentlichen Orten vor. Die Batterien sind in der Regel Hochenergiebatterien, die es ermöglichen, große Reichweiten zu erzielen. Die Ladeleistung ist nicht zwangsweise niedriger als bei Gelegenheitsladern, da es durchaus sinnvoll sein kann, die Fahrzeuge auch während des Tages – zwischen zwei Umläufen – und dann in möglichst kurzer Zeit nachzuladen. Dabei ist die Ladeleistung auch in Relation zur Batteriekapazität zu bewerten. So sind z.B. 300 kW für eine 450 kWh-Batterie keine „Schnellladung“, sehr wohl aber für eine 50 kWh-Batterie.

Die „Gelegenheitsladung“ ist durch das Nachladen der Batterie während der Aufenthalte an Haltestellen definiert. Aufgrund der längeren Stillstandszeiten bieten sich hierfür insbesondere Endstellen an. Je nach vorhandener Stillstandszeit und erforderlicher Energiemenge sind für die Gelegenheitsladung hohe Ladeleistungen von mindestens 300 kW erforderlich. Sofern das Fahrzeug nicht akut für den Betrieb benötigt wird, ist auch eine Ladung im Depot möglich. Dort können niedrigere Ladeleistungen für die Prozesse des Balancing und der Vorkonditionierung der Batterie sowie des Fahrzeuginnenraumes genutzt werden.

In den Marktübersichten (Abbildung 3 und Abbildung 4) ist jeweils die installierte Batteriekapazität der angebotenen Fahrzeuge aufgeführt. Die tatsächlich nutzbare Kapazität ist geringer und wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Batteriealterung, welche die nutzbare Kapazität kontinuierlich verringert. Bei Lithium-Ionen-Batterien wird das Lebensdauerende häufig durch einen Kapazitätsverlust von 20 % definiert.³

Um Batterieschäden und eine frühzeitige Alterung zu vermeiden, dürfen die Randbereiche des Ladezustands nur begrenzt genutzt werden. Diesbezüglich wird ein SOC-Band von 5 % - 95 % angenommen, sodass jeweils die unteren und oberen 5 % der Batteriekapazität als ungenutzt betrachtet werden. Daraus ergibt sich eine konservativ berechnete, über die gesamte Lebensdauer nutzbare Entladetiefe von 72 %.⁴ In Tabelle 1 sind die für die Studie festgelegten Batteriekapazitäten (installiert und nutzbar) der Batteriebusse aufgeführt.

³ Das sogenannte „End-of-Life“ (EOL) wird häufig bei einer (Rest-)Kapazität von 80 %, bezogen auf die anfängliche Kapazität einer neuen Batterie, definiert.

⁴ [Kapazität am Lebensende (80%)] x [nutzbares SOC-Band (90%)] = [Nutzbare Entladetiefe (72%)]

| | | Solobus | Gelenkbus |
|--------------------------------|-------------|---------|-----------|
| Batteriekapazität Typ 1 | installiert | 375 kWh | 500 kWh |
| | nutzbar | 270 kWh | 360 kWh |
| Batteriekapazität Typ 2 | installiert | 475 kWh | 625 kWh |
| | nutzbar | 342 kWh | 450 kWh |
| Batteriekapazität Typ 3 | installiert | 575 kWh | - |
| | nutzbar | 414 kWh | - |

Tabelle 1: Batteriekapazitäten der Referenz-Fahrzeuge

Die technische Machbarkeit und die betrieblichen Aufwände hängen neben der Batteriekapazität von der zur Verfügung stehenden Ladeleistung ab. Diese entscheidet, wie schnell ein Batteriebus nach einer (teilweisen) Entladung für die anstehende, gewünschte Fahrleistung wieder einsetzbar ist. In der Studie wurden Ladeleistungen von 150 kW und 300 kW im Depot bzw. 300 kW auf der Strecke untersucht. Diese bilden das zurzeit gängige Marktangebot im Busbereich ab. Die technischen Eigenschaften und Einsatzgebiete werden in Kapitel 1.1.3 genauer beschrieben.

1.1.1.2 Brennstoffzellenbusse

Neben den Batteriebussen wurden in der Studie auch Brennstoffzellenbusse betrachtet. Diese sind grundsätzlich immer als Brennstoffzellenhybridbusse ausgeführt, was bedeutet, dass an Bord der Fahrzeuge ebenfalls Batterien verbaut sind. Die Batterie ermöglicht unter anderem ein Downsizing der Brennstoffzelle und die Aufnahme von Bremsenergie (Rekuperation).

Für die Kategorie der Brennstoffzellenbusse wurden zwei verschiedene Fahrzeugtypen definiert. Zum einen wurde der Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-REX) analysiert. Dieser zeichnet sich durch eine große Batterie sowie eine kleine Brennstoffzellenleistung mit moderater Tankkapazität aus. Für die Referenzbustypen wurden die Parameter entsprechend dem von EvoBus angekündigten Modell gewählt und bilden somit das aktuelle Marktangebot ab (siehe Tabelle 2).⁵

⁵ Erste Auslieferungen für 2023/2024 angekündigt.

| Parameter | Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender | |
|----------------------------------|---|-----------|
| | Solobus | Gelenkbus |
| Batteriekapazität | 196 kWh | 294 kWh |
| H ₂ -Tankkapazität | 25 kg | 30 kg |
| Nennleistung der Brennstoffzelle | 60 kW | 60 kW |

Tabelle 2: Technische Parameter der Batterie-Referenzbusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender

Der zweite untersuchte Fahrzeugtyp ist der Brennstoffzellenhybridbus. Dieser besitzt kleinere Batteriekapazitäten, dabei jedoch größere Tankkapazitäten und leistungsfähigere Brennstoffzellensysteme (siehe Tabelle 3). In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Pilot- und Demonstrationsprojekte mit Brennstoffzellenhybridbussen durchgeführt. Allerdings ist die Anzahl der aktuell am Markt angebotenen Fahrzeuge begrenzt. Lediglich die Hersteller Van Hool, Caetano und Solaris beteiligen sich an aktuellen Ausschreibungen für Brennstoffzellenhybridbusse im Solobusbereich. Die Gelenkbusse sind dagegen noch nicht am Markt verfügbar und sollen nach Angaben der genannten Hersteller im Jahr 2024 auslieferbar sein. Die genannten Referenzwerte wurden basierend auf den vorhandenen Marktdaten und den Ankündigungen der Hersteller definiert. Die Konfiguration des Gelenk-Brennstoffzellenhybridbusses in Tabelle 3 basiert auf den vorläufigen Angaben von Van Hool.

| Parameter | Brennstoffzellenhybridbus | |
|----------------------------------|---------------------------|-----------|
| | Solobus | Gelenkbus |
| Batteriekapazität | 30 kWh | 132 kWh |
| H ₂ -Tankkapazität | 37,5 kg | 38,5 kg |
| Nennleistung der Brennstoffzelle | 70 kW | 100 kW |

Tabelle 3: Technische Parameter der Brennstoffzellenhybrid-Referenzbusse

1.1.2 Nebenverbraucher und Klimatisierungskonzepte

Der Energiebedarf von Elektrobussen setzt sich aus zwei Kategorien zusammen. Zum einen benötigt das elektrische Antriebssystem Energie, um den Bus zu beschleunigen, zum anderen müssen die Nebenaggregate versorgt werden. Neben dem Druckluftkompressor, der Lenkunterstützung sowie den Informations- und Beleuchtungssystemen ist vor allem das Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystem (HLK) ein wesentlicher Verbraucher. In Elektrobussen fällt, im Gegensatz zu Diesel- oder Gasbussen, kaum nutzbare Abwärme an, weshalb separate Heizsysteme verwendet werden müssen.

Eine Vorgabe für diese Studie war, dass die Elektrobuse gleiche Komfortmerkmale aufweisen sollen, wie die aktuellen Dieselsebusse. Daher ist eine Vollklimatisierung der Fahrzeuge im Sommer erforderlich. Das Kühlsystem wird bei allen betrachteten Elektrobustypen mit elektrischer

Energie versorgt. Für den Heizbetrieb im Winter gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die in den nachfolgenden Nebenverbraucherkonfigurationen zusammengefasst sind:

[ElHe] Vollelektrische Heizung bestehend aus Wärmepumpe und PTC Heizer

[HyHe] Hybridheizung bestehend aus Wärmepumpe und Kraftstoffzusatzheizer

Bei milden Temperaturen (von ca. +3 °C bis +10 °C) ist es möglich, den Innenraum mit einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe zu heizen. Bei tieferen Temperaturen arbeitet die Wärmepumpe weniger effizient, wodurch ein Zusatzheizsystem erforderlich wird. Im Falle der Hybridheizung (HyHe) handelt es sich dabei um einen Kraftstoffzusatzheizer, der in der Regel mit Diesel betrieben wird. Lösungen mit Bio-Ethanol sind technisch möglich, jedoch aktuell kaum verbreitet. Bei einem vollelektrischen Heizsystem (ElHe) wird hingegen ein elektrisches PTC-Heizelement (Positive Temperature Coefficient) eingesetzt. Hierdurch wird ein lokal emissionsfreier Betrieb ermöglicht, der hohe Bedarf an elektrischer Energie führt jedoch zu stark begrenzten Reichweiten. Brennstoffzellenbusse haben den Vorteil, dass ein Teil der Abwärme der Brennstoffzelle zum Heizen des Innenraums genutzt werden kann. Allerdings ist auch hier bei sehr tiefen Temperaturen eine Zusatzheizung erforderlich, die in den aktuell am Markt erhältlichen Fahrzeugen elektrisch ausgeführt ist, wodurch der lokal emissionsfreie Betrieb sichergestellt wird.

Zur Überprüfung der technischen Machbarkeit ist es erforderlich, den jeweils kritischsten Fall (Worst Case) einer Nebenverbraucherkonfiguration zu identifizieren und zu bewerten. Abbildung 5 zeigt eine schematische Darstellung und kennzeichnet die Worst-Case-Szenarien der elektrischen Leistung.

Für den Batteriebus mit vollelektrischer Zusatzheizung handelt es sich beim Worst-Case um den Winterbetrieb mit aktivem elektrischem Zusatzheizer. Für die Hybridheizung ist es umgekehrt, da ein Kraftstoffzusatzheizer verwendet wird. Hier ist der Sommerbetrieb für die maximale elektrische Nebenverbraucherleistung maßgebend. Der Brennstoffzellenbus mit vollelektrischer Zusatzheizung ähnelt dem Batteriebus mit Konfiguration B, allerdings ist der Leistungsbedarf durch die Nutzung eines Teils der Brennstoffzellenabwärme im Winter geringer.

Im Rahmen der Studie wurden sowohl die Nutzung einer vollelektrischen Heizung als auch einer Hybridheizung analysiert. Wie zuvor angesprochen, wirkt sich die Wahl des Klimatisierungskonzepts nicht nur auf die Reichweite und damit auf die technische und betriebliche Machbarkeit aus, sondern auch auf die Umweltauswirkungen der betrachteten Fahrzeugtechnologien. Für die Konfiguration mit einer Hybridheizung wurde das Temperaturprofil des Bedienungsgebiets zugrunde gelegt, um bestimmen zu können, welche Emissionen durch das Heizen entstehen. Üblicherweise schaltet sich der Kraftstoffzusatzheizer ab Temperaturen unterhalb von +4 °C ein, kann aber in der Regel im Fahrzeug individuell eingestellt werden (siehe Abbildung 6).

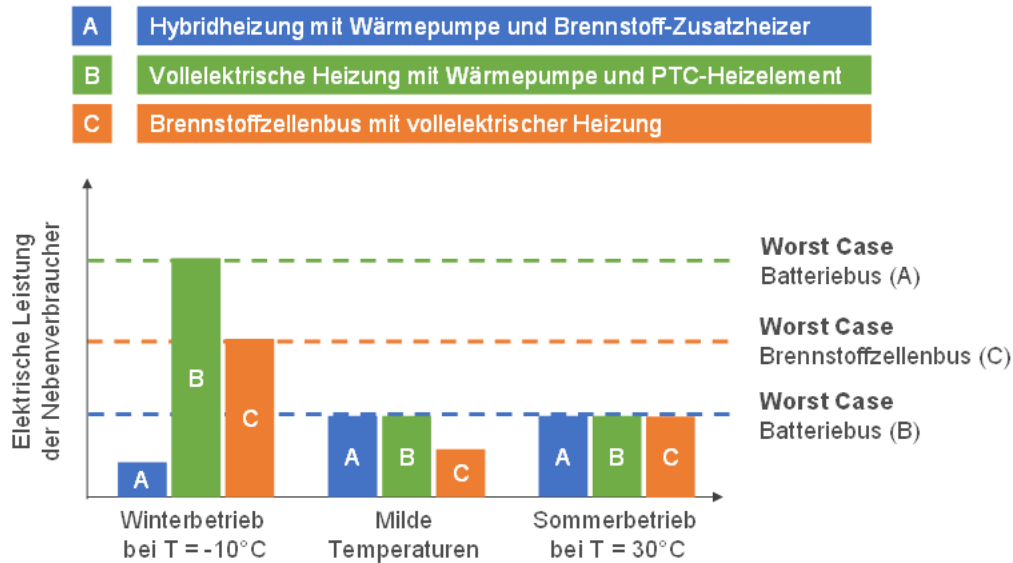


Abbildung 5: Schematische Darstellung der relevanten Worst-Case-Szenarien unterschiedlicher Nebenverbraucherkonfigurationen

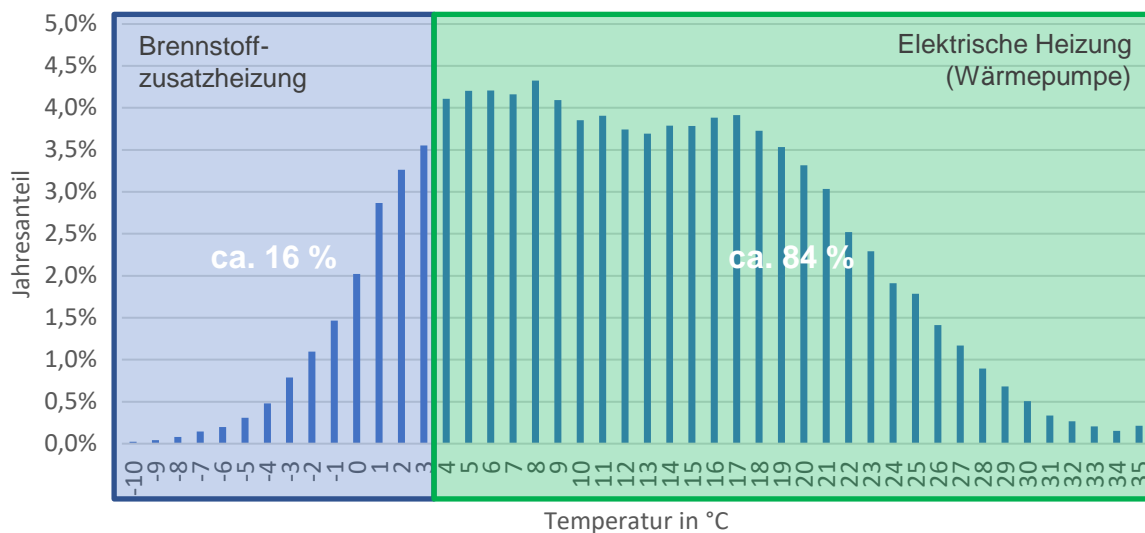


Abbildung 6: Jahresanteil der Stunden mit Durchschnittstemperaturen zwischen -10 °C und +35 °C des Bedingungsgebiets zwischen 5:00 Uhr und 24:00 Uhr

1.1.3 Ladeinfrastruktur für Batteriebusse

In jedem Elektrifizierungsvorhaben spielt neben der Fahrzeugtechnik auch das Thema Infrastruktur eine wesentliche Rolle. Im Folgenden wird auf die notwendige Ladeinfrastruktur für Batteriebusse eingegangen, welche sich in die drei Elemente Netzanschluss, Ladegerät und Kopplungstechnik unterteilt.

Der Netzanschluss stellt die Versorgung der Ladeinfrastruktur mit elektrischer Energie sicher. Aufgrund der hohen Leistungsanforderung ist die Nutzung vorhandener Niederspannungsanschlüsse nur selten möglich. Sowohl an den Endstellen als auch in den Betriebshöfen müssen

daher in den meisten Fällen neue Netzanschlüsse an das Mittelspannungsnetz und eine nachgelagerte Umspannung auf Niederspannung realisiert werden.

Die benötigten Ladegeräte können entweder im Fahrzeug selbst verbaut oder extern (z.B. auf dem Betriebshof oder an Endstellen) aufgestellt werden. Die erste Variante bietet den Vorteil, dass der Flächenbedarf entfällt, den stationäre Ladegeräte mit sich bringen. Allerdings kann die interne Installation zu Lasten der Fahrgastkapazität (Gewicht) und der installierbaren Batteriegröße gehen. Zudem ist die Marktverfügbarkeit dieser Variante sehr begrenzt. Dagegen fokussiert sich die Mehrheit der Bushersteller derzeit auf externe Ladegeräte, um so den Gewichts- und Bauraumbeschränkungen im Fahrzeug zu entgehen und ggf. auch mehrere Fahrzeuge mit nur einem stationären Ladegerät versorgen zu können.

Um die Leistung auf den Bus übertragen zu können, ist eine Kopplungstechnik notwendig, die das Ladegerät mit dem Fahrzeug verbindet. Hier gibt es mehrere Möglichkeiten, die sich zunächst in induktive und konduktive Kopplungstechniken unterteilen lassen. Induktive Lösungen zeichnen sich durch eine berührungslose Energieübertragung aus. Zwar wurden diese erprobt und sind teilweise in Betrieb (z.B. in Braunschweig), haben sich am Markt aber nicht durchsetzen können. Konduktive Techniken, bei denen über Kabel und Stecker oder Pantographen (Stromabnehmer) geladen wird (vgl. Abbildung 7), sind hingegen die zurzeit favorisierte Lösung.

Die Ladung über eine Steckverbindung stellt die klassische Variante der Energieübertragung dar. Durch die geringeren Leistungen (bis 150 kW) aufgrund der Strombegrenzung des ungekühlten Kabels, eignet sich der Einsatz von Steckverbindungen (z.B. des standardisierten Combo-2 Steckers, auch CCS-Stecker genannt) insbesondere bei längeren Stillstandszeiten (z.B. bei der Depotladung). Der Pantograph, welcher sowohl auf dem Fahrzeugdach als auch an einem Lademast als sogenannter invertierter Pantograph befestigt werden kann, kommt meist bei einer Schnellladung, z.B. bei dem Konzept der Gelegenheitsladung, zum Einsatz. Hiermit sind höhere Leistungen von bis zu 600 kW übertragbar.



Stecker



Pantograph und
Haube



Invertierter Pantograph

Abbildung 7: Varianten der konduktiven Kopplungstechnik

Innerhalb der Studie wurden unterschiedliche Ladeleistungen betrachtet, welche sich an Systemen orientieren, die am Markt verfügbar sind. Bei dem Konzept der Depotladung beeinflusst die Ladeleistung die notwendige Ladezeit und somit auch die Betriebsplanung für die Fahrzeuge. Je höher die Ladeleistung gewählt wird, desto schneller kann ein Depotlader wieder eingesetzt werden. In der durchgeführten Studie wurden für alle Gefäßgrößen sowohl eine Standardladung mit 150 kW als auch eine Kombination aus Schnellladung mit 300 kW (z.B. zur untertägigen Ladung zwischen Umläufen) und Standardladung mit 150 kW (z.B. zur Nachtladung) analysiert.

Das Konzept der Gelegenheitsladung erfordert hingegen höhere Ladeleistungen von 300 kW an sinnvoll gewählten Endstellen (siehe hierzu Kapitel 1.3.2). Allerdings benötigen Batteriebusse mit Gelegenheitsladung auch im Depot Ladegeräte, um beispielsweise vor dem ersten Tageseinsatz den Innenraum nicht auf Kosten der Batterie klimatisieren zu müssen oder um zwischen zwei Umläufen schnell nachzuladen. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, wurde eine Kombination aus Schnellladern mit 300 kW und Standardladern mit 150 kW analysiert.

Batteriebusse mit BZ-REX benötigen ebenfalls Ladeinfrastruktur im Betriebshof. In der Studie wurde hierzu eine Ladeleistung von 150 kW zugrunde gelegt.

1.1.4 Wasserstoffbereitstellung

Der Einsatz von Brennstoffzellenbussen erfordert die Bereitstellung von Wasserstoff, dessen ökologischer Fußabdruck von der Art seiner Erzeugung bestimmt wird. Unter der Maßgabe einer zu erzielenden CO₂-Reduktion bietet sich sogenannter „grüner Wasserstoff“ an, welcher mittels Elektrolyse aus regenerativ gewonnener, elektrischer Energie erzeugt wird. Alternativ kann Wasserstoff auch über Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen werden. Allerdings entstehen bei diesem Prozess global wirksame Emissionen wie CO₂ als Nebenprodukte, deren Menge mit der direkten Verbrennung des fossilen Energieträgers selbst vergleichbar ist. Im Rahmen der Studie wurde daher die Verwendung von „grünem Wasserstoff“ betrachtet.

Die Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse kann sowohl in einer externen Anlage als auch auf dem Gelände des Betriebshofes erfolgen, sofern ausreichende Flächen für die Errichtung der Anlage zur Verfügung stehen. Extern erzeugter Wasserstoff kann entweder im gasförmigen (CGH₂), oder flüssigen (LH₂) Zustand angeliefert werden. Wesentliches Unterscheidungskriterium sind dabei die transportierbaren Mengen. Bei der Lieferung im gasförmigen Zustand können in einem LKW-Trailer maximal etwa 800 kg Wasserstoff angeliefert werden [1]. Bei dem Verbrauch eines Solobusses von 9 kg H₂ pro 100 km und einer täglichen Fahrleistung von 250 km entspricht dies dem Tagesbedarf von 35 Fahrzeugen. Erheblich größere Mengen können bei einer Anlieferung im flüssigen Zustand realisiert werden. Die Obergrenze liegt hier bei ca. 3,5 t [1], was dem Tagesbedarf von 155 Solobussen entspricht. Allerdings entstehen durch die Verflüssigung des Wasserstoffs Verluste, die in einem höheren Endpreis resultieren.

Auch wenn der Wasserstoff in flüssiger Form angeliefert wird, erfolgt die Betankung der Fahrzeuge immer mit gasförmigem Wasserstoff. Die am Markt erhältlichen Fahrzeuge nutzen ein 350 bar-Tanksystem mit Druckbehältern auf dem Fahrzeugdach. Die im PKW-Sektor diskutierten und zum Teil im Aufbau befindlichen 700 bar-Systeme haben im ÖPNV-Sektor bislang noch keinen Einzug gehalten und werden von Branchenexperten auch nicht favorisiert [2]. Abbildung 8 zeigt die schematische Zeichnung einer Wasserstofftankstelle für zehn Busse mit LH₂-Anlieferung. Die Tankstelle besteht (neben dem LH₂-Tank) aus einem Druckbehälter, einem Kompressor und der Zapfstelle. Aufgrund des regelmäßigen Kontroll- und Wartungsbedarfs werden die Systeme in der Regel ebenerdig installiert. Der Flächenbedarf beträgt in der dargestellten Ausführung für zehn Busse ca. 162 m². Für höhere Tankkapazitäten werden zusätzliche Druckbehälter und Kompressoren benötigt, was mit einem zusätzlichen Flächenbedarf einhergeht.

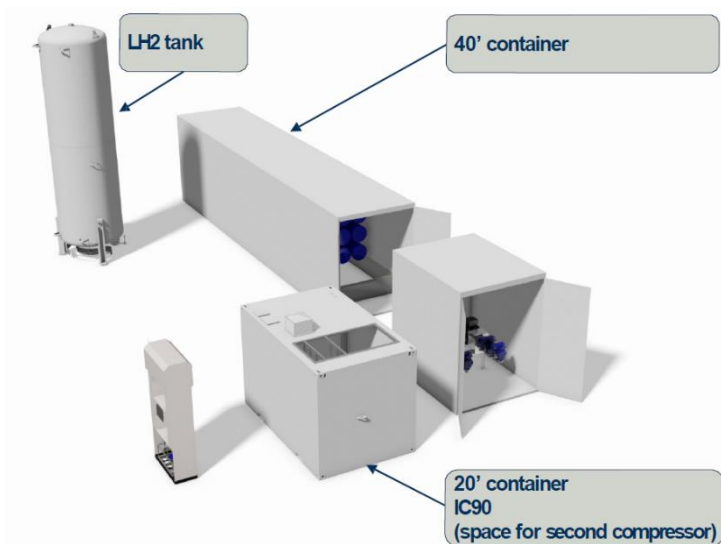


Abbildung 8: Schematische Darstellung einer Wasserstofftankstelle für 10 Busse [3]

Alternativ zur Anlieferung kann der Wasserstoff auch vor Ort („on-site“) erzeugt werden, wodurch der sehr energieintensive Verflüssigungsprozess entfällt. Der LH₂-Tank in Abbildung 8 wird in diesem Fall nicht mehr benötigt. Ein Elektrolyseur wandelt stattdessen mittels Elektrolyse Wasser in Wasserstoff um, welcher gasförmig gespeichert wird. Der Flächenbedarf für den Elektrolyseur und die weiteren Komponenten ist jedoch nicht unerheblich. Abbildung 9 verdeutlicht dies anhand einer Planungsgrundlage für eine Anlage zur täglichen Versorgung von rund 200 bis 250 Bussen.

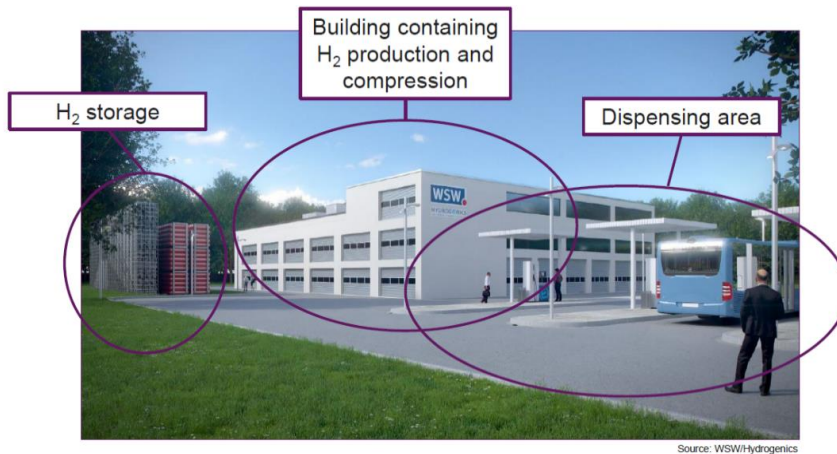


Abbildung 9: Wasserstofftankstelle mit Vor-Ort-Erzeugung mittels Elektrolyse für 200 bis 250 Busse [2]

1.1.5 Zusammenfassung

Die oben dargelegten Grundlagen dienen als Basis für die technische und betriebliche Analyse im AP 2. Die gewählten Parameter (Batteriegröße, Brennstoffzellenleistung, Wasserstofftankgröße, Ladeleistung, Klimatisierungstechnik) für Batteriebusse mit Depotladung und Gelegenheitsladung, Brennstoffzellenhybridbusse sowie Batteriebusse mit BZ-REX, wie sie in Kapitel 1.1.1 bis 1.1.3 beschrieben wurden, sind in Abbildung 10 dargestellt.

In der Studie wurden Depotlader und Gelegenheitslader sowohl mit einer vollelektrischen Heizung als auch mit einer Hybridheizung betrachtet. Die Brennstoffzellenhybridbusse und Batteriebusse mit BZ-REX wurden lediglich mit einer vollelektrischen Heizung analysiert. Für die Ladeleistung von 150 kW wurde die standardisierte CCS-Steckverbindung (ungekühlt) als Kopplungstechnik festgelegt. Für höhere Leistungsanforderungen von 300 kW wurde eine Pantographen-Lösung mit Haube gewählt.

| | Batteriebus | Batteriebus mit BZ-REX | Brennstoffzellenhybridbus |
|-----------|-------------|--|---|
| Solobus | 375 kWh | Bat.: 196 kWh BZ: 60 kW H2-Tank: 25 kg | Bat.: 30 kWh BZ: 70 kW H2-Tank: 37,5 kg |
| | 475 kWh | | |
| | 575 kWh | | |
| Gelenkbus | 500 kWh | Bat.: 294 kWh BZ: 60 kW H2-Tank: 30 kg | Bat.: 132 kWh BZ: 100 kW H2-Tank: 38,5 kg |
| | 625 kWh | | |

| | | | |
|--------------------------|---------------------------------------|------------------------|---|
| Untersuchte Ladeleistung | Batteriebus Batteriebus mit BZ-REX | 150 300 kW 150 kW | Legende Vollelektrische Heizung [EIHe] Hybridheizung [HyHe] |
|--------------------------|---------------------------------------|------------------------|---|

Abbildung 10: Zusammenfassung der Datenbasis der Referenzbustypen

1.2 Erfassung der Betriebsdaten und Darlegung der betrieblichen Situation

Die Datengrundlage für die in dieser Studie betrachtete Fahrleistung bilden Betriebsdaten der SWR, die in einem Betriebsdatenexport zur Verfügung gestellt und im Laufe des AP 1 aufbereitet wurden. Die Betriebsdaten beinhalten 21 Linien, davon 10 Linien im Schülerverkehr. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht dieser Linien. Die betrachteten Gefäßgrößen waren Solo- und Gelenkbusse, betrieben vom Standort des bestehenden Betriebshofs der SWR.

| Linie | Endstellen |
|---|---|
| 1 | Flörsheim |
| 6 | Böllensee - Bauschheim |
| 11 | Klinikum - Hasengrund |
| 31 | Eichengrund - Klinikum |
| 32 | Klinikum - Eichengrund |
| 41 | Königstädten über Konrad-Adenauer-Ring und Astheimer Straße |
| 42 | Königstädten über Astheimer Straße und Konrad-Adenauer-Ring |
| 51 | Haßloch-Nord - Haßloch - Dicker Busch |
| 52 | Dicker Busch - Haßloch - Haßloch-Nord |
| Spät-Linie 70 | Haßloch-Nord - Haßloch - Dicker Busch - Königstädten |
| Spät-Linie 71 | Klinikum - Böllenseesiedlung – Bauschheim |
| 901, 902, 904 906, 908, 909, 910, 912, 914, 916 | Schülerverkehre |

Tabelle 4: Linien im Betriebsdatensatz

Für die Bewertung der technischen Machbarkeit und die Auslegung des Elektrobus-Gesamtsystems ist die Auswahl der betrieblich anspruchsvollsten Tagesart notwendig. Sie wurde anhand der höchsten Liniendienst-Fahrleistung festgelegt. Die Betriebsdaten enthalten 12 Tagesarten, die den Betrieb von Montag bis Freitag in einer Schulwoche („S“) und in einer Ferienwoche („F“) sowie am Wochenende und an Feiertagen abbilden (Tabelle 5). Die Tagesarten „Di S“, „Mi S“ und „Do S“ weisen die höchste Fahrleistung im Liniendienst auf und beinhalten die gleiche Anzahl an Fahrten und die gleiche Gesamtfahrleistung. Deshalb wurde stellvertretend die Tagesart „Do S“ als anspruchsvollste Tagesart für die Systemauslegung in dieser Studie ausgewählt.

| Tagesart | Anz. Fahrten (Liniendienst) | Fahrleistung (gesamt) | Fahrleistung (Liniendienst) |
|----------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Mo F | 253 | 3458 km | 3279 km |
| Mo S | 265 | 3616 km | 3384 km |
| Di F | 253 | 3458 km | 3279 km |
| Di S | 266 | 3638 km | 3398 km |
| Mi F | 253 | 3458 km | 3279 km |
| Mi S | 266 | 3638 km | 3398 km |
| Do F | 253 | 3458 km | 3279 km |
| Do S | 266 | 3638 km | 3398 km |
| Fr F | 253 | 3458 km | 3279 km |
| Fr S | 265 | 3616 km | 3384 km |
| Sa | 157 | 2081 km | 2004 km |
| Sonn-/Feiertag | 80 | 1090 km | 1057 km |

Tabelle 5: Tagesarten im Betriebsdatensatz. Gelb umrandet sind die Tagesarten mit der höchsten Fahrleistung

Der bereitgestellte Datensatz enthält einzelne Umläufe beginnend mit der Ausrückfahrt und endend mit der Einrückfahrt in den Betriebshof. Um den Fahrzeugbedarf zu bestimmen, wurden einzelne Umläufe zu Tageseinsätzen kombiniert. Die Anzahl der Tageseinsätze ist hierbei gleich der benötigten Fahrzeuganzahl, weil ein Fahrzeug pro Tageseinsatz benötigt wird. Tabelle 5 zeigt die in den Betriebsdaten enthaltene Anzahl an Umläufen, aufgeteilt nach Gefäßgröße, sowie den daraus resultierenden Fahrzeugbedarf. Dieser Fahrzeugbedarf entspricht dem Fahrplanbedarf und enthält keine Reservefahrzeuge. Diesem Fahrzeugbedarf ist in Tabelle 5 die Fahrzeuganzahl der aktuellen Flotte gegenübergestellt, die auch Reservefahrzeuge enthält. Abbildung 11 zeigt die Fahrleistung der einzelnen Tageseinsätze von Solo- und Gelenkbussen. Die meisten Tageseinsätze liegen im Bereich von 100 km bis 200 km, wobei die Tageseinsätze der Solobusse auch einen Kurzläufereinsatz unter 50 km als Verstärker beinhalten.

| | Anzahl Umläufe | Fahrzeugbedarf (ohne Reserve) | Aktuelle Flotte |
|-----------|----------------|-------------------------------|-----------------|
| Solobus | 6 | 6 | 7 |
| Gelenkbus | 27 | 15 | 18 |

Tabelle 6: Umläufe und Fahrzeugbedarf sowie die aktuelle Flotte der SWR

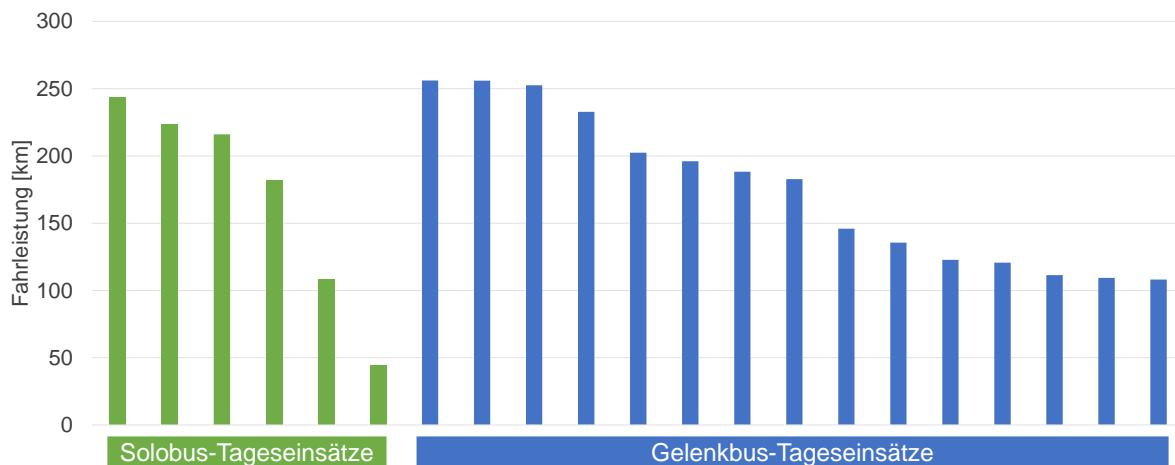


Abbildung 11: Tägliche Fahrleistung pro Fahrzeug

1.3 Evaluierung potenzieller Energieversorgungsorte

Zur Grundlagenermittlung im AP 1 gehörte ebenfalls eine Identifizierung und Analyse der potenziellen Energieversorgungsorte. Dazu wurde zum einen der Betriebshof anhand einer Betriebshofbegehung und der von der SWR zur Verfügung gestellten Informationen analysiert (Kapitel 1.3.1). Zum anderen wurden die Endstellen der in dieser Studie betrachteten Linien auf ihre Eignung als Ladeorte untersucht (Kapitel 1.3.2).

1.3.1 Betriebshof

Bei der Umstellung der konventionellen Flotte auf Elektrobusse spielen der Betriebshof und dessen Potenzial hinsichtlich der Anforderungen an die Infrastruktur eine zentrale Rolle. Diese Anforderungen beziehen sich zum einen auf den vorhandenen Platz, da durch einen eventuellen Fahrzeugmehrbedarf und die Errichtung von Ladeinfrastruktur zusätzliche Abstellflächen notwendig werden. Hier gilt es zu prüfen, in welchem Umfang zusätzliche Flächen verfügbar sind. Zum anderen kommen neue Herausforderungen bezüglich des Energiebedarfs und des Netzanschlusses hinzu. Außerdem werden weitere Anpassungen hinsichtlich der Fahrzeughandhabung, der Betriebsabläufe sowie der Werkstatt (z.B. Dacharbeitsstände) erforderlich.

Zur Aufnahme des Status Quo wurde eine Begehung des Betriebshofes der SWR durchgeführt. In Abbildung 12 ist ein Luftbild des Betriebshofs zu sehen. Welche Funktionen die jeweiligen Bereiche erfüllen, wurde schematisch gekennzeichnet. Die Abstellung der Busse erfolgt in Blockabstellung auf insgesamt 12 Spuren in der Abstellhalle. Pro Spur können maximal 2 Gelenkbusse und ein Solobus hintereinander aufgestellt werden. Die Abstellhalle verfügt über Tore und kann komplett geschlossen werden, z.B. damit die Fahrzeuge im Winter nicht auskühlen.



Abbildung 12: Schematische Kennzeichnung der aktuellen Betriebshofstruktur (Luftbildquelle: Google Maps)

Die Flotte der SWR beinhaltet neben Dieselnissen auch 4 Gas-Gelenkbusse. Zur Betankung dieser Gasbusse befindet sich im südlichen Teil des Betriebshofs eine Erdgastankstelle. Die SWR planen, die Gasbusse bis zum Jahr 2024 auszumustern und die Erdgastankstelle abzubauen. Die dadurch freiwerdende Fläche kann potenziell zum Aufbau der Ladeinfrastruktur oder einer Wasserstofftankstelle genutzt werden.

Um die notwendigen Leistungen für die Nachladung der Batteriebusse bereitzustellen, ist ferner die verfügbare Netzanschlussleistung an dem Betriebshofstandort relevant. Nach Angaben der SWR beträgt die maximal verfügbare Netzanschlussleistung an diesem Standort 2.000 kW. Der Netzanschluss könnte über den südlichen Betriebshofteil an die 20 kV-Leitung in der Walter-Flex-Straße erfolgen.

Nahezu sämtliche Instandhaltungsarbeiten an der aktuellen Busflotte erfolgen in der Werkstatt auf dem Betriebshof (Abbildung 13). Die Werkstatt verfügt über Gruben und Hebeanlagen sowie über eine Krananlage. Weil die SWR auch die Instandhaltungsarbeiten an den Elektrobusen in der eigenen Werkstatt anstrebt, wäre ferner ein Dacharbeitsplatz zweckmäßig. Nach Angaben der SWR ist ferner eine Sanierung des Werkstattdaches notwendig, welche mit der Ertüchtigung für Elektrobusse verknüpft werden könnte.



Abbildung 13: Ansicht der Werkstatt

1.3.2 Potenzielle Ladeorte für Batteriebusse

Der Betrieb von Batteriebussen erfordert ein regelmäßiges Nachladen der Fahrzeuge. Ladeinfrastruktur muss daher – sowohl bei reinen Batteriebussen als auch bei Batteriebussen mit Brennstoffzellen-Range-Extender – im Betriebshof installiert werden. So können Fahrzeuge, die untertags längere Standzeiten vor Ort haben oder über Nacht abgestellt sind, die erforderliche Energiemenge für den kommenden Einsatz nachladen. Weitere Ladestationen für die Gelegenheitsladung der reinen Batteriebusse werden idealerweise an den Endstellen der jeweiligen Linien errichtet. Ladestationen an Haltestellen auf der Strecke sind im Allgemeinen aufgrund geringer Standzeiten ungeeignet.

Die vorläufige Eingrenzung und Auswahl der als Ladeorte geeigneten Endstellen wurde über eine statistische Vorauswahl nach Anzahl der Ankünfte und gesamter Aufenthaltsdauer pro Tag durchgeführt. Anschließend wurde die Eignung zur Errichtung von Ladeinfrastruktur und zur Überlager mehrerer Fahrzeuge bewertet. Tabelle 5 zeigt die 5 Endstellen mit den meisten Ankünften an der ausgewählten Tagesart „Do S“. Als zentraler Knotenpunkt ist lediglich die Endstelle „Rüsselsheim Bahnhof“ als potenzieller Ladeort relevant. Sie weist eine deutlich höhere Anzahl an Ankünften pro Tag auf als alle anderen Endstellen. Auch die Aufenthaltsdauer der Busse an dieser Endstelle ist vergleichsweise sehr hoch, weil die Busse direkt vor Ort verweilen.

| Endstelle | Anzahl Ankünfte pro Tag | Gesamte Aufenthaltsdauer pro Tag |
|---------------------|-------------------------|----------------------------------|
| Rüsselsheim Bahnhof | 283 | 62,8 h |
| Borngrabenschule | 4 | 0,1 h |
| Astheimer Straße | 3 | 0 |
| Europaring | 3 | 0 |
| Adam-Opel-Straße | 3 | 0 |

Tabelle 7: 5 Endstellen mit den meisten Ankünften an der Tagesart „Do S“

Abbildung 14 zeigt die Endstelle „Rüsselsheim Bahnhof“ mit der überdachten Haltestelle, die sich über mehrere Haltepunkte erstreckt. Auf der rechten Bildseite befinden sich ferner 2 Abstellplätze für Gelenkbusse mit längeren Verweildauern an dieser Endstelle. Somit sind die Abstellplätze für längere Ladephasen begrenzt. Hinsichtlich der Schallemissionen aus Ladevorgängen ist außerdem die angrenzende Wohnbebauung zu beachten. Schließlich ist die Nähe der Endstelle zum Betriebshof (ca. 3 km Fahrstrecke in eine Richtung) anzumerken, welche für längere Ladevorgänge eine Weiterfahrt in den Betriebshof nahelegt.



Abbildung 14: Endstelle „Rüsselsheim Bahnhof“

2. Technische und betriebliche Analyse (AP 2)

Im Arbeitspaket 2 wurde die Eignung der unterschiedlichen Fahrzeugkonzepte, Nebenverbraucherkonfigurationen und Ladeleistungen im Hinblick auf eine Elektrifizierung der Busflotte analysiert. Hierfür wurde die technische Machbarkeit evaluiert, also geprüft, ob die Fahrleistung der SWR mit Elektrobussen bedient werden kann. Zusätzlich wurden die betrieblichen Konsequenzen ermittelt, die sich durch Einschränkungen, wie beispielsweise die reduzierte Reichweite gegenüber Dieseln, ergeben. Die Ergebnisse bildeten die Basis für die anschließende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Quantifizierung der Umweltwirkung in Arbeitspaket 3. Zudem ermöglichten sie eine erste Eingrenzung hinsichtlich eines Umstellungskonzepts, welches in Arbeitspaket 4 erarbeitet wurde.

Im Gegensatz zu Dieseln gibt es bei Elektrobussen wesentliche Rahmenbedingungen, welche die technische Machbarkeit einer Elektrifizierung und den Betrieb erheblich beeinflussen. Für Batteriebusse mit Depotladung ist hier vor allem die begrenzte Batteriekapazität zu nennen, welche zur Folge hat, dass Dieseln mit hohen Fahrleistungen nicht ohne betriebliche Anpassungen als Batteriebusse darstellbar sind. Bei Batteriebusen mit Gelegenheitsladung ist nicht so sehr die Batteriekapazität, sondern vielmehr die benötigte Ladezeit das wesentliche Kriterium. Umläufe müssen in regelmäßigen Abständen ausreichend Zeit an Endstellen mit Ladestationen aufweisen, sodass die zuvor verbrauchte Energie wieder nachgeladen werden kann. Bei Brennstoffzellenhybridbussen und Batteriebusen mit BZ-REX sind die betrieblichen Konsequenzen aufgrund der höheren Reichweiten geringer. Abhängig von den Einsatzbedingungen, kann aber auch hier eine Umgestaltung der Umläufe und eine Begrenzung der Fahrleistung notwendig werden. Die genannten Rahmenbedingungen wurden in der Studie für jede Technologie und für die Fahrleistung jeder Gefäßgröße detailliert untersucht. Die dabei verwendete Methodik und die Kriterien sind nachfolgend erläutert.

2.1 Methodik

Die Bewertung der technischen Machbarkeit und die Bestimmung der betrieblichen Mehraufwendungen erfolgte unter der Maßgabe, dass ein zuverlässiger Betrieb unter allen Bedingungen gewährleistet sein muss. Zum einen bezieht sich diese Vorgabe auf die Einsatzbedingungen (wie z.B. den Worst-Case-Energiebedarf der Nebenverbraucher), zum anderen auf den technischen Zustand der Fahrzeuge (wie beispielsweise den Kapazitätsverlust der Batterie durch Alterung). Daher wurde die jeweils ungünstigste Kombination angenommen, bestehend aus maximalem Energiebedarf der Nebenverbraucher und gealterter Batterie am Ende ihrer Lebensdauer (mit 80 % Restkapazität).

Für Gelegenheitsladerbusse müssen weitere Kriterien berücksichtigt werden, die im Rahmen der Risikobewertung in dieser Studie festgelegt wurden. Verspätungen auf einer Linie beeinflussen - gesetzt den Fall, dass Anschlussfahrten pünktlich angetreten werden sollen - unmittelbar die zur Verfügung stehende Ladezeit. Deshalb wurde ein Verspätungspuffer von 3 min

definiert, welcher an jeder Endstelle mit Gelegenheitsladung von der verfügbaren Ladezeit abgezogen wurde (vgl. Abbildung 15). Ferner wurde von der verfügbaren Ladezeit an der Ladestation eine Ankopplungs- und Entkopplungszeit des Fahrzeugs abgezogen.

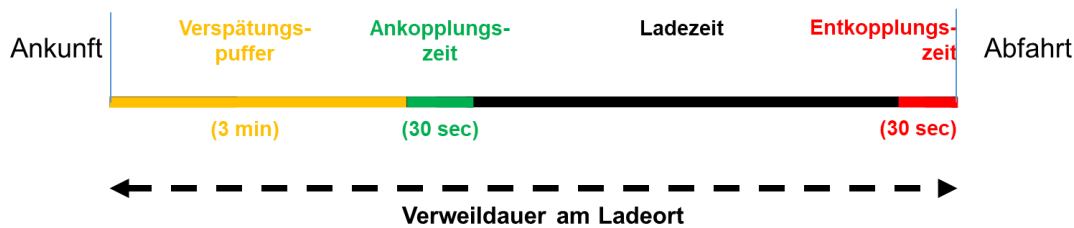


Abbildung 15: Zusammensetzung der Verweildauer am Ladeort

Neben diesem zeitlichen Verspätungspuffer für Ladevorgänge können auch längere Verspätungen im Betrieb sowie Defekte an der Ladestation oder am Fahrzeug zu einem Ausfall von Ladevorgängen führen. Um auch in diesen Situationen einen robusten Betrieb zu ermöglichen, gilt es, Energiereserven vorzuhalten. Für die Studie wurde daher für alle Elektrobuskonfigurationen ein minimaler betrieblicher Puffer von ca. 10 km Reichweite unter Worst Case-Bedingungen definiert.

Der betriebliche Puffer wurde bei der energiebasierten Planung somit als Energiepuffer beibehalten, sodass Elektrobusse immer mit einer Energiereserve fahren. Sie können damit auch verkürzte Ladezeiten oder leicht geänderte Linienwege kompensieren. Wichtig dabei ist, dass der Energiebedarf im Mittel wieder der Batterie zugeführt und die Untergrenze des Ladezustands der Batterie nicht unterschritten wird.

Für alle Batteriebusse wurde die Möglichkeit einer Nachladung am Betriebshof mit Ladeleistungen entsprechend Kapitel 1.1.1.1 angenommen. Auch für Brennstoffzellenhybridbusse und Batteriebusse mit BZ-REX wurde in dieser Studie (anstelle von Fahrten zu möglichen externen Tankstellen) eine Betankung auf dem Betriebshof zu Grunde gelegt.

Im Unterschied zu einer reinen Machbarkeitsprüfung, deren Ergebnis die Aussage „machbar bzw. nicht machbar“ wäre, wurden im Rahmen dieser Studie auch die betrieblichen Anpassungen untersucht, mit denen eine Elektrifizierung umsetzbar wäre. Für Depotladerbusse bedeutet dies zum Beispiel, dass Umläufe mit einem zu hohen Energiebedarf unterteilt und Zwischenladungen im Betriebshof in den Betriebsablauf integriert werden (siehe Abbildung 16). Abhängig von der Liniencharakteristik ergeben sich hieraus ein Fahrzeugmehrbedarf, zusätzliche Fahrerzeiten und zusätzliche Leerkilometer, welche im Rahmen der Analyse erfasst und in der späteren Kostenrechnung berücksichtigt wurden.

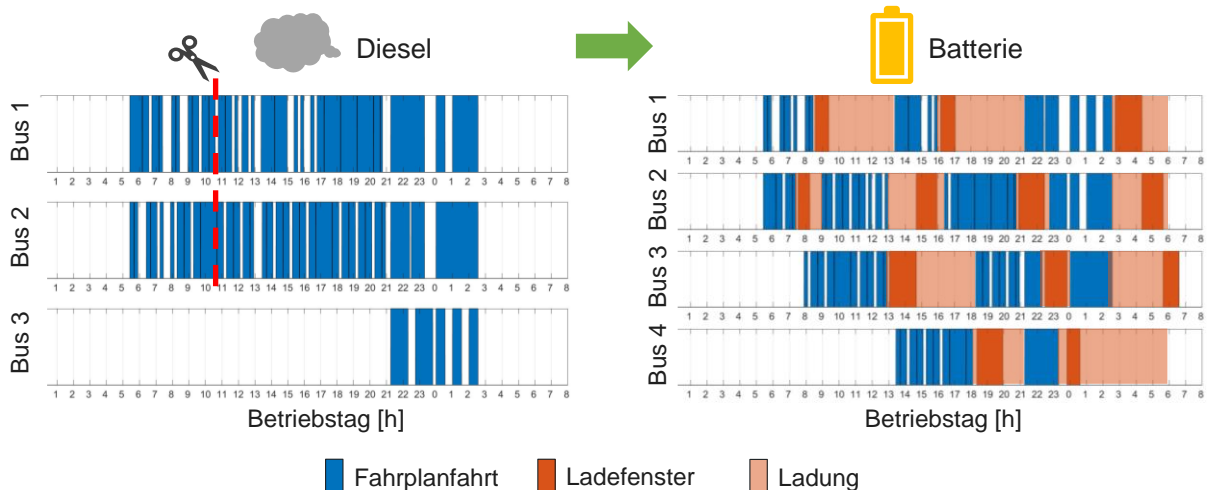


Abbildung 16: Betriebliche Anpassungen bei der Umstellung von Diesel- auf Batteriebusse

Die Definition von unterschiedlichen Referenzbustypen, Nebenverbraucher-Konfigurationen und Infrastrukturvarianten führt zu einem sehr umfassenden Ergebnisraum. Für jede Gefäßgröße wurden alle Permutationen analysiert und bewertet. Abbildung 17 veranschaulicht den Zusammenhang der Ergebnisse, wobei die Anzahl der tatsächlich simulierten und optimierten Szenarien deutlich größer ist als in diesem Bild dargestellt.

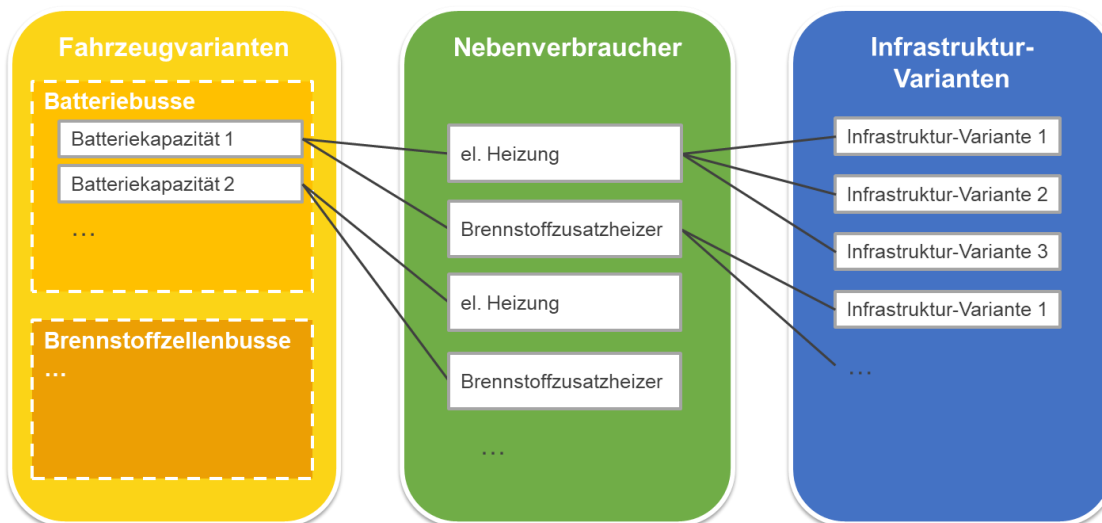


Abbildung 17: Zusammenhang der Ergebnisse mit den unterschiedlichen Fahrzeugvarianten, Nebenverbraucherkonfigurationen und Infrastrukturvarianten

2.2 Technische Machbarkeitsprüfung ohne betriebliche Anpassungen

Zuerst erfolgte im AP 2 die Prüfung der technischen Machbarkeit ohne betriebliche Anpassungen der bestehenden Dieselbusumläufe entsprechend den bereitgestellten Betriebsdaten (Kapitel 1.2). Die Machbarkeitsprüfung erfolgte für die einzelnen Umläufe der anspruchsvollsten Tagesart „Do S“ mit den in dieser Studie betrachteten Elektrobustypen. Dabei wurden die Worst-Case-Bedingungen mit hohem Nebenverbrauch und gealterter Batterie (vgl. Kapitel 2.1) sowie ohne Nachlademöglichkeiten außerhalb des Betriebshofs betrachtet.

So wurde die technische Machbarkeit für jeden der in den Betriebsdaten enthaltenen Umläufe der Solo- und Gelenkbusse geprüft. Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigen zusammenfassend die Ergebnisse der Machbarkeitsprüfung für Solo- und Gelenkbusse für unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen. Bereits mit einer kleineren Batterie und einer vollelektrischen Heizung sind 44 % der Gelenkbusumläufe technisch machbar. Im Falle der Solobusse sind mit dieser Konfiguration nur 2 kurze Umläufe bzw. 33 % der Umläufe machbar. Durch den Einsatz von Batteriebussen mit einer höheren Batteriekapazität und Hybridheizung oder durch den Einsatz von Brennstoffzellenbussen können fast alle Umläufe elektrifiziert werden. Jedoch können diese Fahrzeugkonzepte zu höheren Kosten führen. Daher sind die Betrachtung der Fahrzeugkonzepte mit kleineren Batterien in Kombination mit betrieblichen Anpassungen und ein Kostenvergleich der Fahrzeugkonzepte sinnvoll. Diese Analyseschritte wurden in den folgenden Arbeitspaketen der Studie durchgeführt.

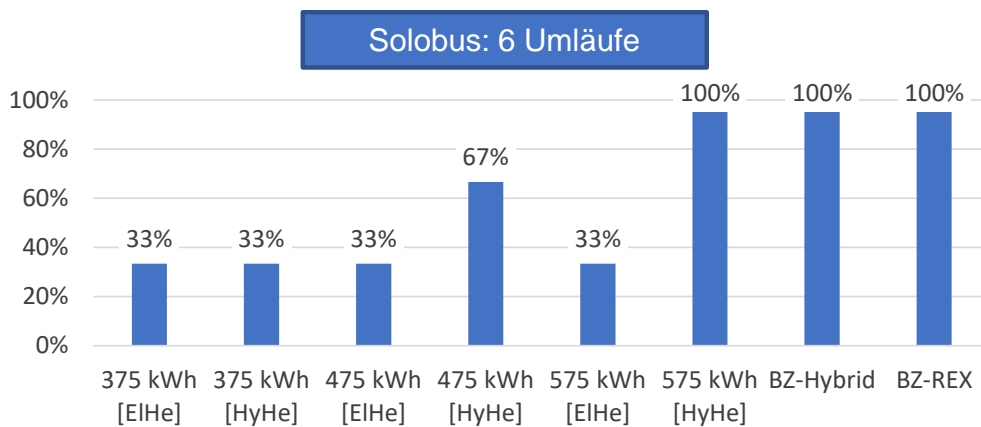


Abbildung 18: Relativer Anteil technisch machbarer Umläufe der Solobusse

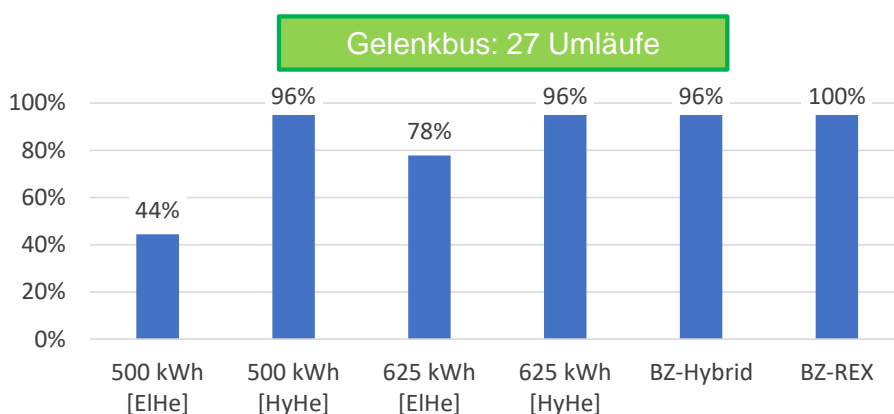


Abbildung 19: Relativer Anteil technisch machbarer Umläufe der Gelenkbusse

2.3 Technische und betriebliche Analyse mit betrieblichen Anpassungen

In diesem Kapitel werden zuerst exemplarisch einzelne Detailergebnisse der technisch-betrieblichen Analyse mit betrieblichen Anpassungen für die verschiedenen Solo-Elektrobuskonfigurationen gezeigt (Kapitel 2.3.1). Anschließend findet sich im Kapitel 2.3.2 eine Ergebnisübersicht über weitere untersuchte Szenarien.

2.3.1 Detailergebnisse

Als Vergleichsreferenz für die verschiedenen Elektrobustypen wurde für jede Gefäßgröße ein Szenario mit Dieselbusbetrieb berechnet. Im Folgenden werden einzelne exemplarische Ergebnisse der technisch-betrieblichen Analyse mit betrieblichen Anpassungen am Beispiel des Szenarios der Solobusse im Detail diskutiert. Um die in den Betriebsdaten enthaltenen Linienfahrten der Solobusse zu bedienen, kann ihr Betrieb mit 6 Dieselbussen und den in Abbildung 20 dargestellten Umlaufplänen erfolgen. An der ausgewählten Tagesart „Do S“ (vgl. Kapitel 1.2) werden 966 km durch Solobusse im Liniendienst absolviert. Hinzu kommen die Leerkilometer, die sich für alle Solobusse auf ca. 52 km belaufen. Ein Solo-Dieselbus legt also durchschnittlich ca. 170 km zurück. Insgesamt werden 6 Fahrten zum Betriebshof absolviert.

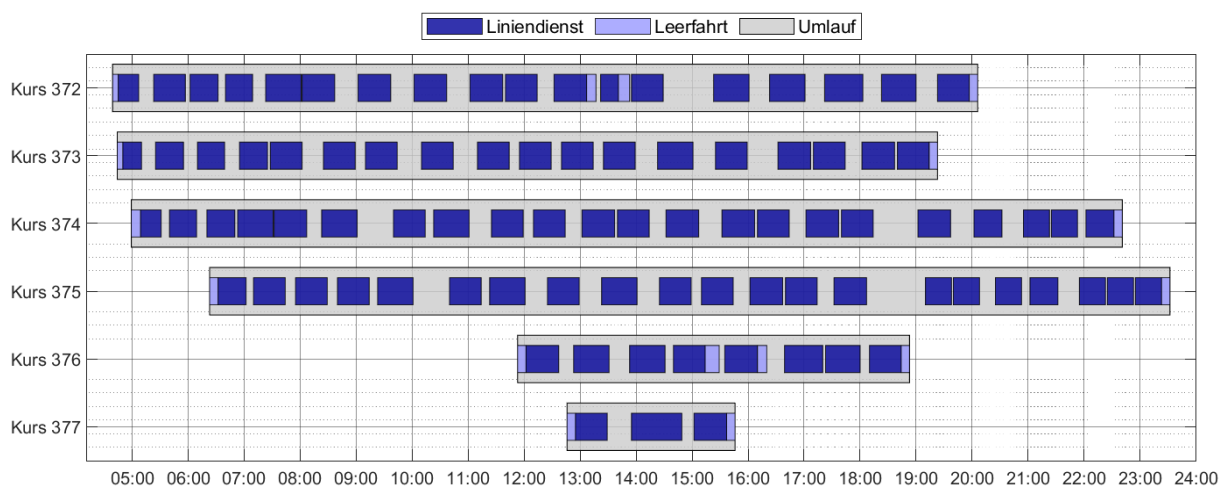


Abbildung 20: Alle Kurse der Diesel-Solobusse

Die gezeigten Dieselbusumläufe sind mit dem Depotladerbus Typ 1 (375 kWh Batterie) und einer vollelektrischen Heizung (ElHe) nicht darstellbar. Eine Elektrifizierung der Solobusfahrleistung mit diesem Referenzbustyp ist nur mit betrieblichen Anpassungen und unter Einsatz eines zusätzlichen Fahrzeugs möglich (vgl. Abbildung 21). Die Fahrzeuge müssten häufig zum Betriebshof geschickt werden, um eine Nachladung durchzuführen. Hierdurch würden die insgesamt gefahrenen Leerkilometer auf ca. 83 km steigen. Die Anzahl der Fahrten zum Betriebshof würde sich auf 13 Fahrten erhöhen.

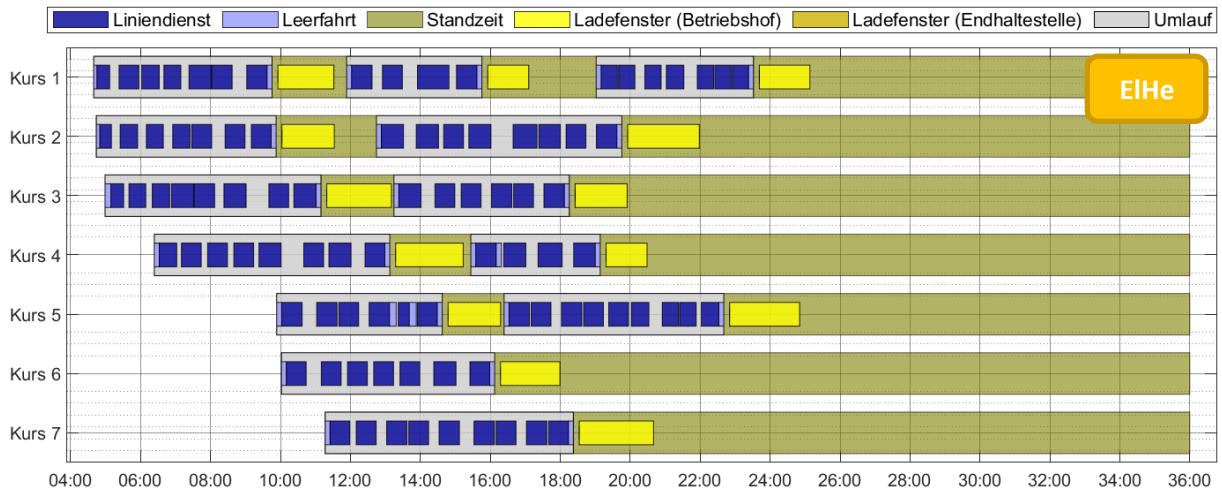


Abbildung 21: Alle Kurse der Solobusse Depotlader Typ 1 mit vollelektrischer Heizung und 150 kW Standardladung

Die Hybridheizung (HyHe) verwendet bei tiefen Temperaturen einen Brennstoffzusatzheizer und senkt somit den Energiebedarf im Worst Case erheblich. Der Betrieb der Solobusse mit Depotladerbussen Typ 1 und Hybridheizung ist in Abbildung 22 dargestellt. Durch den Einsatz der Hybridheizung können mehr Linienfahrten ohne Nachladung erbracht werden und die Leerkilometer würden sich auf insgesamt ca. 67 km verringern. Der Fahrzeugbedarf könnte auf 6 Busse reduziert werden, was dem Fahrzeugbedarf der Diesel-Referenz gleichkommt. Die Anzahl der Fahrten zum Betriebshof würde sich auf 10 Fahrten reduzieren.

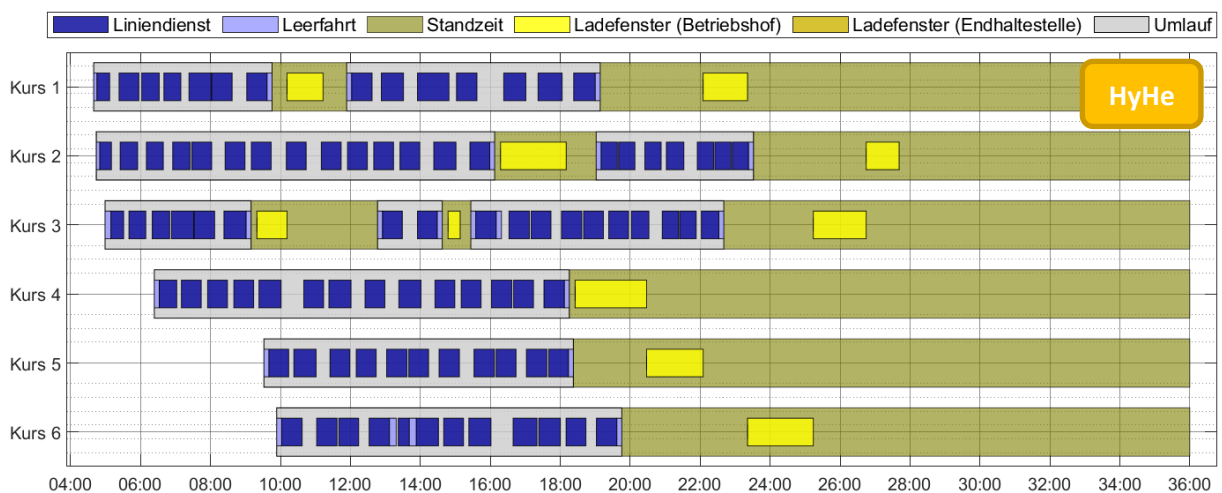


Abbildung 22: Alle Kurse der Solobusse Depotlader Typ 1 mit Hybridheizung und 150 kW Standardladung

Statt der Verwendung einer Hybridheizung kann die Reduktion des Fahrzeugbedarfs auf den Wert der Diesel-Referenz auch durch den Einsatz von Schnellladung mit 300 kW Ladeleistung oder eine höhere Batteriekapazität erreicht werden. Ebenso verursacht der Einsatz von Brennstoffzellenbussen keinen Fahrzeugmehrbedarf gegenüber der Diesel-Referenz. Eine Übersicht der Ergebnisse aller betrachteten Fahrzeugkonfigurationen für Solo- und Gelenkbusse wird im folgenden Kapitel gegeben.

2.3.2 Ergebnisübersicht und Diskussion

Unter Berücksichtigung der technischen Parameter der Elektrobussysteme wurden Betriebskonzepte entwickelt und hinsichtlich des Fahrzeugbedarfs, der Leerkilometer und der Fahrzeit bewertet. Als Referenz wurden die durch energiebasierte Umlafoptimierung erstellten Umlaufpläne des Dieselbusbetriebs herangezogen. Dieselbusse unterliegen aufgrund ihrer hohen Reichweite kaum betrieblichen Einschränkungen, weshalb das Dieselbusbetriebskonzept die Untergrenze bezüglich der Fahrzeuganzahl definiert.

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse für das Szenario mit ausschließlicher Depotladung sowie für das Szenario mit dem zusätzlichen Ladeort „Rüsselsheim Bahnhof“ für die Gelegenheitsladung nach Buskonfigurationen der Solobusse dargestellt. Der Fahrzeugmehrbedarf ist farblich hervorgehoben. Konzepte ohne erforderliche zusätzliche Fahrzeuge im Vergleich zum Dieselbusbetrieb sind grün markiert, Konzepte mit Fahrzeugmehrbedarf dagegen rot. Falls ein Szenario nicht betrachtet wurde, weil es inhaltlich nicht sinnvoll ist, wurde dies in der Tabelle mit einem „-“ gekennzeichnet. Zum Beispiel wurde die Gelegenheitsladung nur in Kombination mit der 300 kW Schnellladung betrachtet.

| Solobus | Diesel-Referenz | Fahrzeugmehrbedarf | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|------|--------------------|------|---------------------|------|--------------------|------|---------------------|------|----------|-----------|---|
| | | Typ 1 Standardlader | | Typ 1 Schnelllader | | Typ 2 Standardlader | | Typ 2 Schnelllader | | Typ 3 Standardlader | | BZ-REX | BZ-Hybrid | |
| | | ElHe | HyHe | ElHe | HyHe | ElHe | HyHe | ElHe | HyHe | ElHe | HyHe | ElHe | ElHe | |
| Depotladung | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Depotladung und Ladeort Bf. | 6 | - | - | 0 | 0 | - | - | 0 | 0 | - | - | - | - | - |
| | | 150 kW | | 300 kW | | 150 kW | | 300 kW | | 150 kW | | | | |
| | | 375 kWh Batterie | | | | 475 kWh Batterie | | | | 575 kWh Bat. | | BZ-Busse | | |

Tabelle 8: Ergebnisübersicht des Fahrzeugmehrbedarfs für Solobusse

Die Ergebnisse lassen sich anhand der getroffenen technischen Annahmen gut plausibilisieren. Der Depotladerbus des Typs 1 ist mit der kleineren Batterie ausgestattet. In Kombination mit vollelektrischer Heizung (ElHe) und Standardladung von 150 kW im Depot verursacht dieses Fahrzeugkonzept einen Fahrzeugmehrbedarf von 1 Fahrzeug. Es werden also 7 Fahrzeuge dieses Typs benötigt, um die Nutzfahrleistung der Solobusse zu erbringen. Weiterhin wird der Einfluss der Nebenverbraucherkonfigurationen deutlich. Der Einsatz einer Hybridheizung (HyHe) bei diesem Fahrzeugtyp ermöglicht es, die Solobusse ohne Fahrzeugmehrbedarf einzusetzen. Ferner wird durch den Einsatz von Schnellladung mit 300 kW oder einer mittelgroßen Batterie mit 475 kWh Batteriekapazität der Betrieb der Solobusse mit vollelektrischer Heizung ohne Fahrzeugmehrbedarf ermöglicht. Da beide Fahrzeugkonzepte keinen Fahrzeugmehrbedarf aufweisen, bringt Gelegenheitsladung am Bahnhof gegenüber reiner Depotladung mit Schnellladern keine Vorteile im Hinblick auf die Fahrzeuganzahl. Brennstoffzellenhybridbusse und Batteriebusse mit BZ-REX zeigen ebenfalls keinen Fahrzeugmehrbedarf auf.

Die getätigten Schlussfolgerungen aus der Untersuchung der Solobusse gelten tendenziell auch für die Ergebnisse der Gelenkbusse, wie Tabelle 9 zeigt. Der Einsatz von Batterie-Gelenkbussen mit Hybridheizung verursacht auch bei einer moderaten Batteriekapazität von 500 kWh und reiner Depotladung mit Standardladern mit einer Leistung von 150 kW keinen

Fahrzeugmehrbedarf. Gleiches gilt für Brennstoffzellenhybridbusse und Batteriebusse mit BZ-REX. Der Betrieb von Batterie-Gelenkbussen mit vollelektrischer Heizung führt bei reiner Depotladung dagegen zu einem Fahrzeugmehrbedarf. Dieser kann durch die Umsetzung von Schnellladung im Depot oder durch größere Batteriekapazität auf 1 Fahrzeug begrenzt werden. Durch die Gelegenheitsladung am Bahnhof kann der Fahrzeugmehrbedarf auch beim Einsatz der vollelektrischen Heizung gänzlich vermieden werden.

| Gelenkbus | Diesel-Referenz | Fahrzeugmehrbedarf | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------|---------------------|------|--------------------|------|---------------------|------|--------|-----------|
| | | Typ 1 Standardlader | | Typ 1 Schnelllader | | Typ 2 Standardlader | | BZ-REX | BZ-Hybrid |
| | | ElHe | HyHe | ElHe | HyHe | ElHe | HyHe | ElHe | ElHe |
| | | 150 kW | | 300 kW | | 150 kW | | | |
| Depotladung | 14 | 2 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Depotladung und Ladeort Bahnhof | 14 | - | - | 0 | 0 | - | - | - | - |
| | | 500 kWh Batterie | | 625 kWh Bat. | | BZ-Busse | | | |

Tabelle 9: Ergebnisübersicht des Fahrzeugmehrbedarfs für Gelenkbusse

Schließlich wurde ein potenzielles Betriebszenario untersucht, bei dem die gesamte Fahrleistung durch Gelenkbusse erbracht wird. Die Gelenkbusse übernehmen in diesem Szenario also die Fahrleistung der Solobusse. Auch in diesem Szenario verursachen Batteriebusse mit Hybridheizung sowie Brennstoffzellenbusse keinen Fahrzeugmehrbedarf. Die gesamte Fahrleistung kann durch 20 Gelenkbusse erbracht werden. Durch Gelegenheitsladung am Bahnhof kann der Fahrzeugmehrbedarf auch beim Einsatz von Batteriebussen mit vollelektrischer Heizung vermieden werden.

| Gesamte Fahrleistung mit Gelenkbussen | Diesel-Referenz | Fahrzeugmehrbedarf | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------|------|--------------------|------|---------------------|------|--------|-----------|
| | | Typ 1 Standardlader | | Typ 1 Schnelllader | | Typ 2 Standardlader | | BZ-REX | BZ-Hybrid |
| | | ElHe | HyHe | ElHe | HyHe | ElHe | HyHe | ElHe | ElHe |
| | | 150 kW | | 300 kW | | 150 kW | | | |
| Depotladung | 20 | 3 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Depotladung und Ladeort Bahnhof | 20 | - | - | 0 | 0 | - | - | - | - |
| | | 500 kWh Batterie | | 625 kWh Bat. | | BZ-Busse | | | |

Tabelle 10: Ergebnisübersicht des Fahrzeugmehrbedarfs für Gelenkbusse

Insgesamt lässt sich aus den Betrachtungen schlussfolgern, dass die Fahrzeugkonzepte der Batteriebusse mit Hybridheizung sowie der Brennstoffzellenhybridbusse und der Batteriebusse mit BZ-REX sowohl bei Solo- als auch bei Gelenkbussen keinen Fahrzeugmehrbedarf verursachen. Um beim Einsatz einer vollelektrischen Heizung bei Solo-Batteriebussen einen Fahrzeugmehrbedarf zu vermeiden, ist die Verwendung einer mittelgroßen Batterie oder von Schnellladung im Betriebshof erforderlich. Bei Gelenk-Batteriebussen in Verbindung mit einer vollelektrischen Heizung und reiner Depotladung muss dagegen mit einem Fahrzeugmehrbedarf gerechnet werden. Gelegenheitsladung am Bahnhof kann zielführend sein, um diesen Fahrzeugmehrbedarf zu vermeiden.

3. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Quantifizierung der Umweltwirkung (AP 3)

Im vorhergehenden Arbeitspaket wurden, auf Basis der in AP 1 erarbeiteten Grundlagen, die technischen und betrieblichen Konsequenzen einer Elektrifizierung anhand unterschiedlicher Elektrobuskonzepte ermittelt. Welches Konzept im Zusammenhang mit welchem Szenario zu bevorzugen ist, lässt sich jedoch erst mit Hilfe einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ermitteln, die zu Beginn dieses Kapitels dargestellt wird (Kapitel 3.1). Ferner wurde im AP 3 eine Quantifizierung der Umweltwirkungen unterschiedlicher Elektrobuskonzepte vorgenommen (Kapitel 3.2). Im Anschluss an deren Darstellung, wird im letzten Teil des Kapitels das Fazit vorgestellt, das aus der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und der Umweltwirkung gezogen wurde (Kapitel 3.3). Diese Zusammenfassung der Ergebnisse diente zur Auswahl eines Elektrobuskonzepts, woraufhin im AP 4 eine Umstellungsplanung erarbeitet wurde.

3.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

3.1.1 Kostenannahmen

Im Folgenden sind die Annahmen aufgeführt, welche zur Berechnung der Total Costs of Ownership (TCO) in der Wirtschaftlichkeitsanalyse herangezogen wurden. Die TCO entsprechen der Summe der diskontierten Zahlungsflüsse, die über den Betrachtungszeitraum für die unterschiedlichen Buskonzepte anfallen. Die einzelnen Kostenannahmen wurden mit den SWR abgestimmt und werden im Folgenden vorgestellt. Für die Barwertmethode der TCO-Rechnung in dieser Studie wurde ein effektiver Kalkulationszinssatz von 3,5 % verwendet. Der Betrachtungszeitraum wurde zu 12 Jahren gewählt, was der aktuellen Abschreibungsdauer für Dieselbusse der SWR entspricht. Abbildung 23 zeigt eine Übersicht der Kostenpositionen, die in ihrer Gesamtheit den Total Costs of Ownership entsprechen. In der TCO-Rechnung in AP 3 wurden explizit keine Kosten für Personalschulungen, zusätzliches Werkstattpersonal, zusätzliche Gebäude (z.B. für Ladeinfrastruktur), IT-Infrastruktur (wie ein Lademanagement) oder sonstige Kosten, die möglicherweise mit der Elektrifizierung der Busflotte anfallen, berücksichtigt.

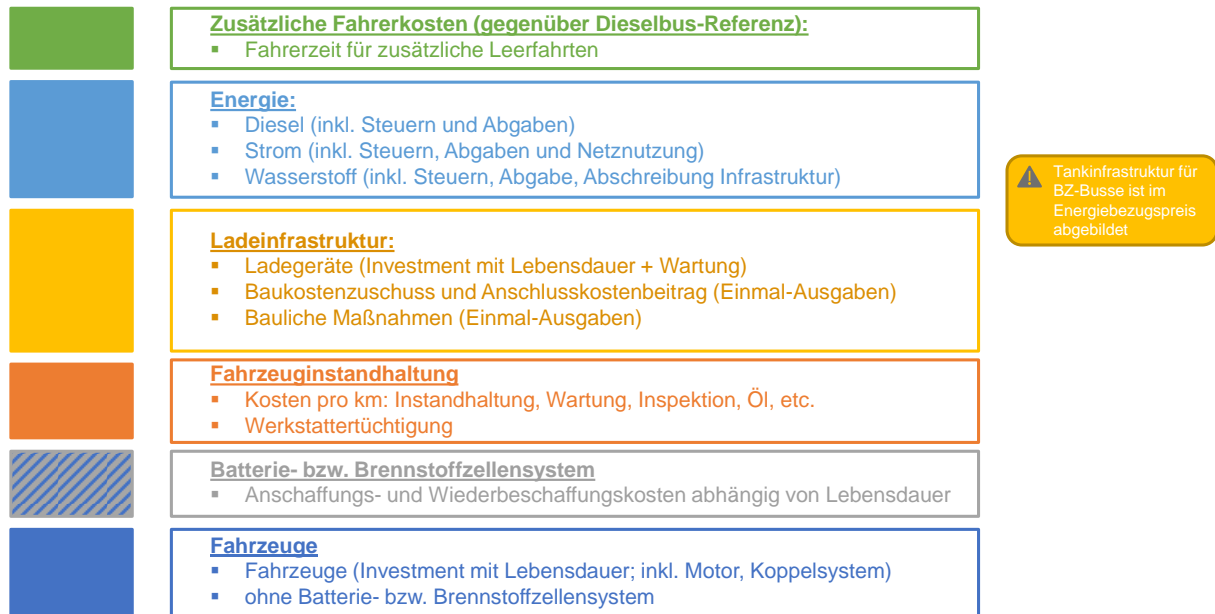


Abbildung 23: Aufschlüsselung der betrachteten TCO-Kostenpositionen

3.1.1.1 Fahrzeugkosten

Die in der Studie betrachteten Fahrzeugkosten beziehen sich im Falle der Elektrobusse auf die Investitionskosten für das Basisfahrzeug mit elektrischem Antrieb. Kosten für die benötigten Batterie- bzw. Brennstoffzellensysteme und deren Ersatzbeschaffungen wurden in der Kostenanalyse gesondert berücksichtigt. Beim Dieselreferenzbus erfolgte keine Unterteilung in Basisfahrzeug und Antriebssystem.

Tabelle 11 gibt einen Überblick über die angenommenen Investitions- und Instandhaltungskosten. Hierbei werden die Fahrzeuganschaffungspreise sowohl inklusive als auch exklusive des Batterie- bzw. Brennstoffzellensystems dargestellt. Die Fahrzeugpreise der Dieselbusse wurden den Erfahrungen der SWR aus früheren Busbeschaffungen entsprechend angesetzt. Die Fahrzeugpreise der Elektrobusse wurden der aktuellen Marktsituation und den Ausschreibungserfahrungen entsprechend gewählt. Die Preisobergrenzen, die das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (nachfolgend: „BMDV“) seit dem Jahr 2021 zur Ermittlung der förderfähigen Kosten für Elektrobusse im Rahmen ihrer Bundesförderung festgelegt hat, legen nahe, dass sich die Preise für alle Batterie- und Brennstoffzellenbusse in Zukunft tendenziell nach unten entwickeln könnten.

Die angegebenen Instandhaltungskosten fallen in den nachfolgenden Berechnungen für jeden zurückgelegten Kilometer (auch für Leerkilometer) an. Die Instandhaltungskosten der Dieselbusse wurden, in Abstimmung mit den SWR, für Solobusse auf 0,49 €/km und für Gelenkbusse auf 0,90 €/km beziffert. Bezüglich der Instandhaltungskosten für Elektrobussysteme gibt es bislang noch keine belastbaren Aussagen. Der elektrische Antrieb selbst bietet zwar im Vergleich zu konventionellen Antrieben grundsätzlich das Potenzial eines wartungsärmeren Betriebs, jedoch resultiert ein nicht unerheblicher Teil der Wartungs- und Instandhaltungskosten

aus Komponenten, die nicht direkt dem Antrieb zuzuordnen sind (z.B. den Türantrieben etc.). Weiterhin bringen Kopplungssysteme zum Laden neue Fahrzeugkomponenten mit sich, die wiederum einer regelmäßigen Wartung bedürfen. Die genannten Punkte berücksichtigend, wurden die Instandhaltungskosten für Elektrobusse pro gefahrenen Kilometer auf dem gleichen Niveau wie für Dieselsebuse angesetzt. Die Instandhaltungskosten für Brennstoffzellenhybridbusse und für Batteriebusse mit BZ-REX wurden, aufgrund des komplexeren Systems aus Brennstoffzellensystem und Batterie, höher angesetzt als für Diesel- oder reine Batteriebusse.

| Referenzbustyp | Gefäßgröße | Fahrzeugpreis (exkl. Batterie-/BZ-System) in € | Fahrzeugpreis (inkl. Batterie-/BZ-System) in € | Instandhaltung in €/km | Restwert |
|-----------------------------------|------------|--|--|------------------------|----------|
| Dieselsebus Euro VI | Solobus | 253.000 | - | 0,49 | 10 % |
| Hybrid-Dieselsebus Euro VI | Gelenkbus | 387.000 | - | 0,90 | 10 % |
| Batteriebus Typ 1 | Solobus | 332.500 | 520.000 | 0,49 | 0 % |
| Batteriebus Typ 2 | Solobus | 332.500 | 570.000 | 0,49 | 0 % |
| Batteriebus Typ 3 | Solobus | 332.500 | 620.000 | 0,49 | 0 % |
| Batteriebus Typ 1 | Gelenkbus | 480.000 | 730.000 | 0,90 | 0 % |
| Batteriebus Typ 2 | Gelenkbus | 480.000 | 792.500 | 0,90 | 0 % |
| Brennstoffzellenhybridbus | Solobus | 450.000 | 605.000 | 0,55 | 0 % |
| Brennstoffzellenhybridbus | Gelenkbus | 600.000 | 836.000 | 1,00 | 0 % |
| Batteriebus mit BZ-REX | Solobus | 450.000 | 650.000 | 0,55 | 0 % |
| Batteriebus mit BZ-REX | Gelenkbus | 600.000 | 849.000 | 1,00 | 0 % |

Tabelle 11: Kostenannahmen für Fahrzeuge, Instandhaltung und Restwert

Es ist zu beachten, dass der Austausch von Batterie- und Brennstoffzellensystemen in der hiesigen Studie nicht zu den Instandhaltungskosten gezählt wurde. Stattdessen wurde der Austauschbedarf separat, fahrleistungs- und konzeptspezifisch unter der Kategorie „Batterie- und Brennstoffzellenkosten“ ermittelt.

Für alle Bustechnologien wurde eine Nutzungsdauer von 12 Jahren hinterlegt, welche dem Betrachtungszeitraum entspricht. Die Annahmen zum Fahrzeugrestwert, nach Ablauf der Nutzungsdauer, sind in Tabelle 11 enthalten. Für Dieselsebuse entsprechen die Werte den Angaben der SWR, für Elektrobuse wurden sie zu 0 % definiert, was eine konservativere Abschätzung für die Weiternutzung neuartiger Technologien ist.

3.1.1.2 Batterie- und Brennstoffzellenkosten

Wesentliche Komponenten in Elektrobussen sind die Batterie- und Brennstoffzellensysteme. Sie bestimmen nicht nur die technische Leistungsfähigkeit der Fahrzeuge, sondern auch ihre Kosten. Es ist davon auszugehen, dass die Lebensdauer des Antriebssystems geringer ist, als die des übrigen Fahrzeugs und dass Ersatzbeschaffungen im Betrachtungszeitraum notwendig werden.

Für Batteriebusse wurde eine Hochenergiebatterie mit kapazitätsspezifischen Kosten von 500 €/kWh angenommen. Zwar nutzen Gelegenheitslader größere Ladeleistungen als Depotlader von bis zu 300 kW; durch die großen Batteriekapazitäten sind jedoch Stromraten im Bereich von ca. 1 C oder weniger erforderlich. Deshalb wurde beiden Konzepten die Nutzung einer Hochenergiebatterie zu identischen Kosten unterstellt.

Für Batteriebusse mit BZ-Range-Extender und Brennstoffzellenhybrid-Gelenkbus gelten die gleichen Annahmen wie für reine Batteriebusse mit einer Hochenergiebatterie. Für den Brennstoffzellenhybrid-Solobus wurde aufgrund der kleineren Batteriekapazität ein leistungsfähigeres Batteriesystem mit LTO-Technologie angenommen. Dieses wurde mit höheren Kosten von 1.200 €/kWh berücksichtigt.

Die Bewertung der Batterielebensdauer erfolgte auf Basis der jeweiligen Nutzung im Liniendienst. Die Lebensdauer ist dabei mittels äquivalenter Vollzyklen (also der Anzahl möglicher Kapazitätsdurchsätze bezogen auf die Anfangskapazität) abgebildet. So wurde für Hochenergiebatterien eine Lebensdauer von 2.750 Vollzyklen angenommen. Auf dieser Grundlage erfolgte im Rahmen der Kostenrechnung eine Bestimmung der benötigten Ersatzbeschaffungen, für jede Linie und jedes Fahrzeugkonzept individuell.

Für die Brennstoffzellensysteme wurden die spezifischen Kosten zu 1.700 €/kW angenommen. Die Lebensdauer einer Brennstoffzelle wird von den Herstellern für gewöhnlich in Stunden angegeben. Mit aktuellen Systemen wurde eine Lebensdauer von etwa 25.000 Betriebsstunden demonstriert, welche auch für die hiesige Studie angenommen wurde. Äquivalent zur Betrachtung der Batteriesysteme, erfolgt die Bestimmung von Austauschintervallen auch für die Brennstoffzellensysteme anhand der tatsächlichen Belastung (hier in Betriebsstunden).

Um den potenziellen Markthochlauf entsprechend zu berücksichtigen, wurde für die Batterie- und Brennstoffzellensysteme ein linearer Preisverfall von 30 % im 12-jährigen Betrachtungszeitraum angenommen. Ersatzbeschaffungen erfolgen ebenfalls zu diesen reduzierten Kostensätzen. Ersatzsysteme, die zum Ende des Betrachtungszeitraums noch funktionsfähig sind, wurden mit ihrem Restwert in der Kostenrechnung berücksichtigt. Durch diese Betrachtung wird der Effekt des fixen Betrachtungszeitraums von 12 Jahren abgemildert. Ansonsten würden sich Batterieneubeschaffungen nach bspw. 9 Jahren nachteilig auf die Kosten auswirken.

3.1.1.3 Energiekosten

Im Rahmen der Studie wurden die Energiekosten für unterschiedliche Energieträger betrachtet. Die Kosten für den Energieträger „Diesel“ sind durch einen sehr volatilen Verlauf mit einem steilen Anstieg in den letzten Monaten gekennzeichnet. In dieser Studie wurde von einem Dieselpreis von 1,72 € pro Liter für das Jahr 2022 ausgegangen. Für die Preisentwicklung wurde eine Steigerung von 60 % innerhalb des Betrachtungszeitraums angenommen.

Für die Stromkosten wurde nach Absprache mit den SWR ein Arbeitspreis von 0,35 €/kWh für das Jahr 2022 angesetzt. Als Preisentwicklung wurde eine Steigerung von 30 % innerhalb des Betrachtungszeitraums angenommen. Zudem wurde ein jährlicher Leistungspreis von 7,96 €/kW nach Preisblatt 2022 der Energieversorgung Rüsselsheim GmbH angenommen.

Für den Wasserstoffbezug bieten Anbieter, wie z.B. Air Liquide oder die Firma Linde, Komplettlösungen inklusive der Errichtung der Tankstelle und der Belieferung mit Wasserstoff. Teilweise wird der Betrieb der Tankstelle ebenfalls angeboten. Die Vertragslaufzeiten erstrecken sich üblicherweise auf 15 Jahre. Für die Wasserstoffbereitstellung bei der Anlieferung von „grünem Wasserstoff“ liegt die aktuelle Marktpreisindikation bei 20,00 €/kg Wasserstoff. Darin sind die Aufwände für die Wasserstoffinfrastruktur, den Tankstellenbetrieb und die Stromkosten enthalten. Da die Herstellung des „grünen Wasserstoffs“ mit klimaneutralem Strom erfolgt, wurde für den Wasserstoffpreis ebenso wie für den Strompreis eine Steigerung von 30 % innerhalb des Betrachtungszeitraums als Preisentwicklung angenommen.

3.1.1.4 Infrastrukturkosten

Batteriebusse

Für Batteriebusse wird zwischen 3 Bestandteilen der Infrastruktur unterschieden: Ladeinfrastruktur, Stromversorgungsinfrastruktur und Netzanschluss. Die Ladeinfrastruktur beinhaltet Ladegeräte, Kopplungstechnik mit Ladehauben, Verkabelung und ihre Errichtung. Aus den aktuell am Markt üblichen Preisen wurden die in Tabelle 12 aufgeführten Kostenannahmen abgeleitet. Für die jährlichen Instandhaltungskosten wurden jeweils 5 % der Anschaffungskosten angenommen. In aktuellen Ausschreibungen sind sinkende Preise für die Ladeinfrastruktur zu beobachten, die durch den Import der Leistungsmodule aus China entstehen. Um diese Entwicklung abzubilden, wurde im 12-jährigen Betrachtungszeitraum ein linearer Preisverfall von 15 % angenommen. Die Lebensdauer bzw. Abschreibungsdauer für Ladeinfrastruktur wurde, in Absprache mit den SWR, auf 12 Jahre festgelegt, damit die Ladeinfrastruktur innerhalb des Betrachtungszeitraums abgeschrieben wird.

| Standort | Leistung in kW | Kosten in € |
|-----------------------|----------------|-------------|
| Depot | 150 | 95.000 |
| Depot oder Endstellen | 300 | 190.000 |

Tabelle 12: Kostenannahmen für die Ladeinfrastruktur der Batteriebusse

Zur Stromversorgungsinfrastruktur gehören eine Mittelspannungsschaltanlage, Transformatoren, AC-Kabel sowie deren Errichtung und die dazugehörigen baulichen Maßnahmen. Für die Kosten der Stromversorgungsinfrastruktur im Betriebshof wurde, basierend auf Kostenindikationen der SWR in Höhe von 231.000 € für ein Transformatorhaus mit zwei Transformatoren à 1.000 kW, ein Betrag von 115,5 €/kW angenommen. Für die Kosten der Stromversorgungsinfrastruktur an der Endstelle „Bahnhof Rüsselsheim“ wurde, aufgrund ihrer Lage im Stadtgebiet und der damit zusammenhängenden (evtl. aufwändigeren) Bauarbeiten, ein höherer Betrag von 230 €/kW angenommen. Die Lebensdauer bzw. Abschreibungsdauer für die Stromversorgungsinfrastruktur wurde, in Absprache mit den SWR, auf 25 Jahre festgelegt.

Der Netzanschluss beinhaltet einerseits den Baukostenzuschuss für den Ausbau der höheren Netzebenen und andererseits den Anschlusskostenbeitrag für die Kabelverlegung und die Herichtung des Anschlusses. Für den Baukostenzuschuss wurde, entsprechend der Kostenindikation der SWR von 151.665 € für 10 Ladesäulen à 150 kW, ein Betrag von 101,11 €/kW angenommen. Der Anschlusskostenbeitrag wurde durch die SWR bei 140 m Anschlussleitung und 2.000 kW Anschlussleistung auf 117.600 € abgeschätzt. Dementsprechend wurde der Anschlusskostenbeitrag in dieser Studie zu 101,11 €/kW angenommen. Die Lebensdauer bzw. Abschreibungsdauer des Netzanschlusses wurde in Absprache mit der SWR auf 40 Jahre festgelegt.

Brennstoffzellenhybridbusse und Batteriebusse mit BZ-REX

Für den Betrieb der Brennstoffzellenhybridbusse und der Batteriebusse mit BZ-REX ist Wasserstoffinfrastruktur notwendig. Die Kosten für die Wasserstoffinfrastruktur sind in den angenommenen Wasserstoffkosten enthalten (s. Kapitel 3.1.1.3). Für Batteriebusse mit BZ-REX wird ferner Ladeinfrastruktur benötigt, für welche die gleichen Annahmen wie bei Batteriebussen getroffen wurden.

3.1.1.5 Kosten für zusätzliche Fahrzeit

Die begrenzten Reichweiten der Elektrobussysteme erfordern unter Umständen Anpassungen der Betriebsplanung, sodass zusätzliche Fahrzeuge benötigt werden. Aus diesem Umstand kann ein erhöhter Bedarf an Leerfahrten resultieren. Ein erheblicher Kostenfaktor ist daraufhin die zusätzliche Fahrzeit, die aufgrund der Anpassungen notwendig wird. In Absprache mit den SWR wurden Fahrerkosten von 33,66 €/h angesetzt. Dieser Wert wurde in Anlehnung an den tariflich festgelegten Stundensatz gewählt und konstant über den gesamten Betrachtungszeitraum angenommen.

3.1.1.6 Werkstattertüchtigungskosten

Die Umstellung auf Elektrobusse erfordert darüber hinaus eine Ertüchtigung der Werkstätten, die weitere Kosten verursacht. Um diese Kosten in der Studie abzubilden, wurden die Mehraufwendungen für die Werkstattertüchtigung in Absprache mit den SWR und im Hinblick auf die jeweils betrachteten Bustechnologien abgeschätzt.

Der in Tabelle 16 im Anhang I dargestellte zusätzliche Ausrüstungsbedarf der Werkstatt für Elektrobusse wurde nach Empfehlungen des Leitfadens der VGB [4] zusammengestellt. Hier wurden sowohl der Bedarf als auch die Kosten einzelner Ausrüstungskomponenten bzw. -anlagen für eine Anzahl von 50 Bussen abgeschätzt. Für die Studie wurden daraus die Werkstattertüchtigungskosten pro Bus berechnet, welche in Tabelle 13 dargestellt sind.

| Bustechnologie | Kosten für Werkstattertüchtigung (€/Bus) |
|-------------------------------------|--|
| Batteriebusse | 8.000 |
| Brennstoffzellenhybridbusse | 10.000 |
| Batteriebusse mit BZ-Range Extender | 10.000 |

Tabelle 13: Kostenannahmen für die Werkstattertüchtigung pro Bus

Die Abschreibung der Werkstattertüchtigung wurde, gleich dem Betrachtungszeitraum, auf 12 Jahre festgelegt und als Mischkalkulation über länger und kürzer lebende Bestandteile berechnet. Kosten für die Beschaffung weiterer, evtl. notwendiger Flächen (im Vergleich zum Dieselmotortrieb) zur Erweiterung der Werkstatt, Projektkosten (für Planung etc.) sowie potenzielle Förderungen wurden dabei nicht berücksichtigt. Mögliche Vorteile, die evtl. aus der Abschaffung Dieselmotorspezifischer Werkstattausrüstung resultieren, wurden ebenfalls nicht berücksichtigt.

3.1.2 Ergebnisse und Diskussion

Auf Basis der technischen und betrieblichen Analyse wurden die TCO bestimmt. Hierbei wurden die Bestandteile der TCO entsprechend Abbildung 23 betrachtet. In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für unterschiedliche Solo- und Gelenkbuskonzepte erläutert.

Abbildung 24 stellt die Annuitäten pro Nutzkilometer (im Liniendienst mit Fahrgästen) für die Diesel-Referenz sowie für die Solobuskonzepte mit Hybridheizung dar. Im Dieselmotortrieb werden 6 Solobusse eingesetzt. Die Gesamtkosten der Diesel-Referenz sind um ca. 0,5 € pro Nutzkilometer günstiger als die des Depotladers Typ 1 mit Standardladung. Da beim Betrieb mit dem Depotlader Typ 1 kein Fahrzeugmehrbedarf entsteht, weist dieses Buskonzept die geringsten Gesamtkosten unter den elektrischen Buskonzepten auf. Buskonzepte mit höheren Batteriekapazitäten verursachen aufgrund der Batterieanschaffung höhere Kosten. Buskonzepte mit Schnellladung sind wegen der aufwändigeren Ladeinfrastruktur kostenintensiver.

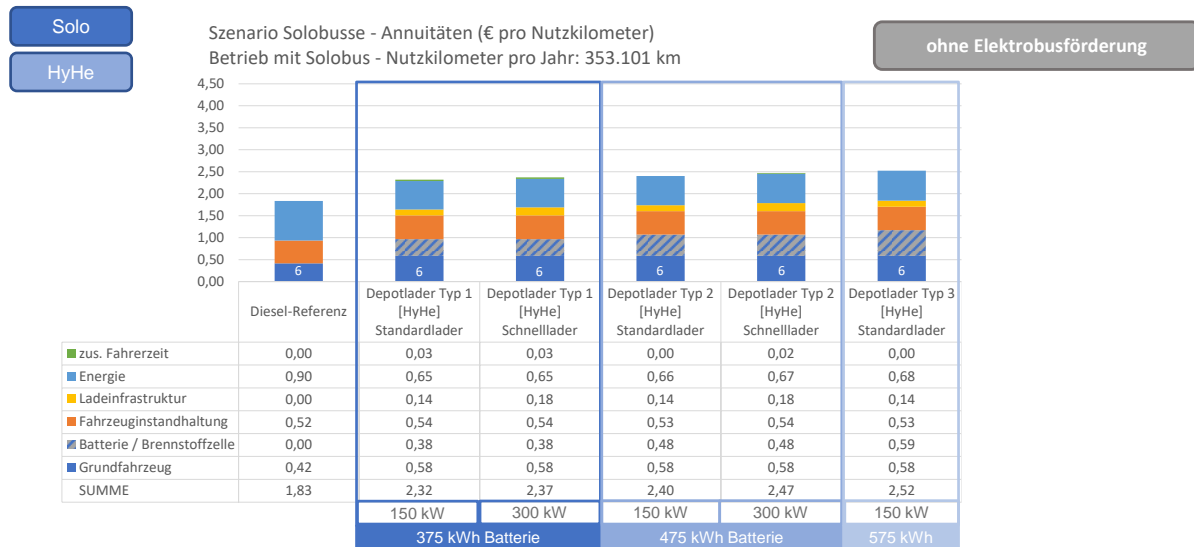


Abbildung 24: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Solobuskonzepte mit Hybridheizung

Aufgrund geringerer Anforderungen bei der Systemauslegung mit Hybridheizung sind die entsprechenden Buskonfigurationen kostengünstiger als jene mit vollelektrischer Heizung (Abbildung 25). Die kostengünstigste Variante unter den Batteriebusen mit vollelektrischer Heizung stellt in diesem Szenario der Depotlader Typ 2 mit Standardladung dar. Durch dessen moderate Batteriekapazität können der Fahrzeugmehrbedarf vermieden und die zusätzliche Fahrzeit reduziert werden. Auffällig sind die Kosten für eine Elektrifizierung mit Brennstoffzellenhybridbussen und mit Batteriebusen mit BZ-Range-Extender. Obwohl diese Varianten keinen Fahrzeugmehrbedarf gegenüber dem Dieselsbusbetrieb aufweisen, ist eine Elektrifizierung hier teurer als mit reinen Batteriebusen. Dies liegt überwiegend an den hohen Energiekosten durch die Nutzung des Wasserstoffs.

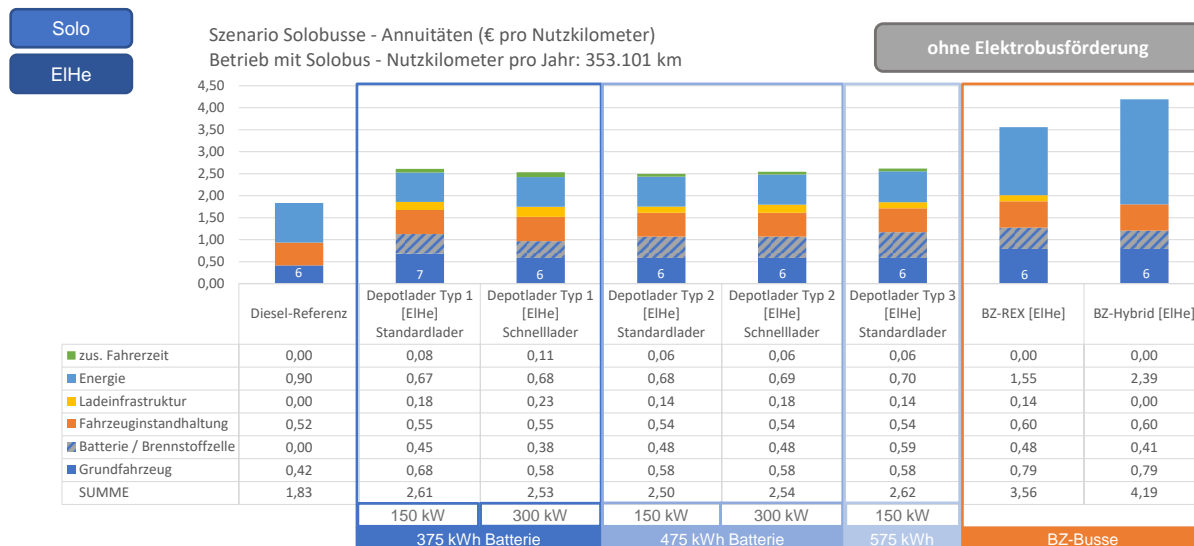


Abbildung 25: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Solobuskonzepte mit vollelektrischer Heizung

Gelenkbuskonzepte mit Hybridheizung erweisen sich, ebenso wie Konzepte mit Solobussen des Depotlader Typs 1, als am wirtschaftlichsten (Abbildung 26). Gelenkbuskonzepte mit voll-elektrischer Heizung verursachen dagegen höhere Kosten (Abbildung 26). Durch die anspruchsvolleren Anforderungen beim Einsatz der vollelektrischen Heizung, erweist sich hier das Buskonzept mit moderater Batteriekapazität von 500 kWh und Gelegenheitsladung an der Endstelle „Rüsselsheim Bahnhof“ als wirtschaftlichste Option. Dank des Einsatzes der Gelegenheitsladung werden Fahrzeugmehrbedarf und zusätzliche Fahrzeit (durch Ein- bzw. Ausrückfahrten) vermieden. Ferner erscheint auch das Konzept mit Depotlader Typ 1 und Schnellladung im Betriebshof als eine wirtschaftliche Option. Dieses ist gegenüber dem günstigsten Konzept mit vollelektrischer Heizung nur ca. 2 % teurer.

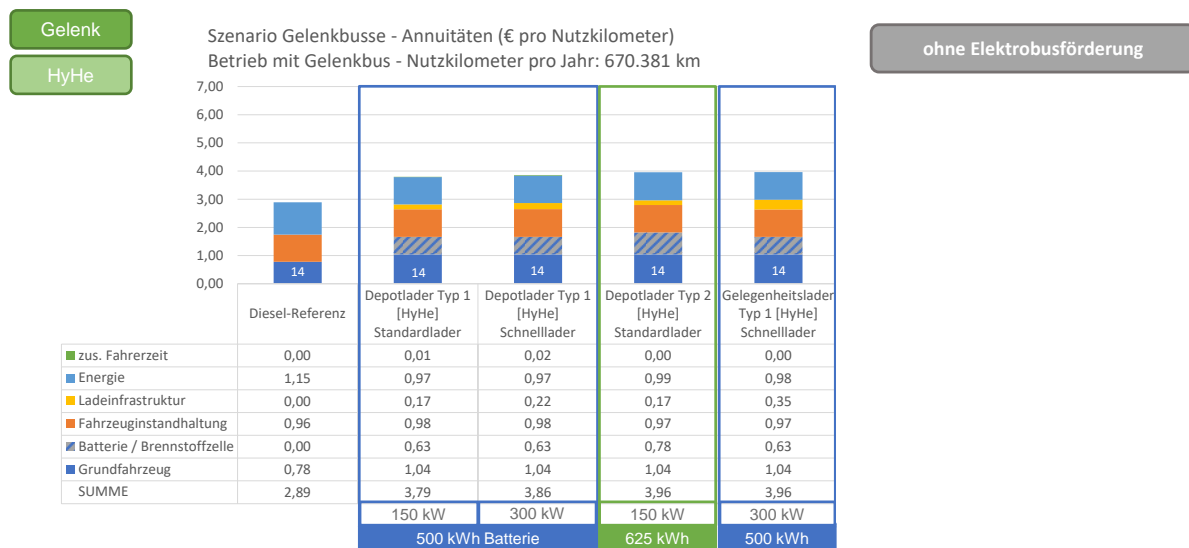


Abbildung 26: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Gelenkbuskonzepte mit Hybridheizung

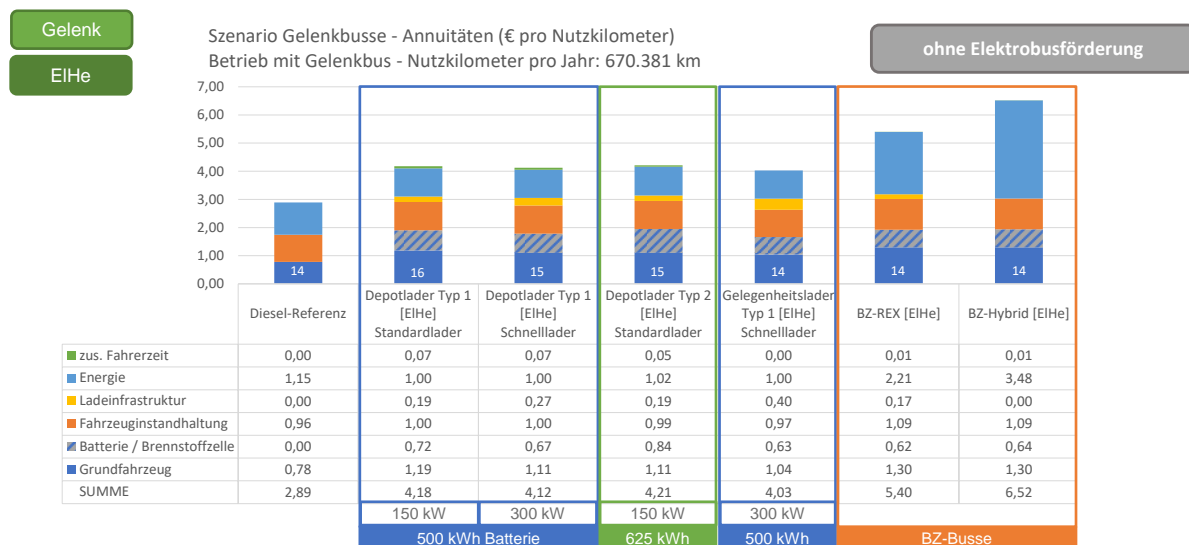


Abbildung 27: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Gelenkbuskonzepte mit vollelektrischer Heizung

Ferner wurde in diesem Arbeitspaket ein potenzielles Szenario untersucht, in dem die Gelenkbusse die gesamte Fahrleistung der SWR übernehmen, bestehend aus der Fahrleistung der

Solo- und Gelenkbusse. Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dieses Szenario sind im Anhang II dargestellt. Tendenziell ähneln die Ergebnisse denen aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Gelenkbusse. Bei Einsatz der Hybridheizung stellt der Depotlader Typ 1 das kostengünstigste Konzept dar, während beim Einsatz der vollelektrischen Heizung der Gelegenheitslader Typ 1 die kostengünstigste Option ist.

3.2 Quantifizierung der Umweltwirkung

Im Folgenden werden zuerst die Methodik der Emissionsrechnung zur Quantifizierung der Umweltwirkung vorgestellt (Kapitel 3.2.1) und anschließend die Ergebnisse für die einzelnen Buskonfigurationen diskutiert (Kapitel 3.2.2).

3.2.1 Methodik

Als genormtes Instrument (DIN EN ISO 1404-4) dient die Ökobilanzierung dazu, die Umweltauswirkungen verschiedener Produkte über deren gesamten Lebenszyklus zu vergleichen (Life Cycle Assessment). Da ein Produktleben, von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung, recht komplexen Zusammenhängen unterliegt, müssen Betrachtungsgrenzen gezogen werden. Soll das Emissionsreduktionspotenzial durch den Austausch einer Dieselbus- mit einer Elektrobusflotte ermittelt werden, bietet es sich an, die Betrachtungsgrenzen um den Betrieb der Busse und um die Energie- bzw. die Kraftstoffbereitstellung zu ziehen.

Die Bilanzierung des Dieselbusses erfolgt entsprechend Abbildung 28. Als Dieselreferenz wird die Abgasnorm „EURO VI“ genutzt. Für die CO₂-Emissionen der Dieselreferenz wurde, entsprechend der Norm EN 16258, der Well-to-Wheel-Emissionswert von 3,15 kgCO₂e/l bei 7 Vol.-% Biodieselanteil zugrunde gelegt [5]. Für den Dieselverbrauch wurden, basierend auf den Daten der SWR-Busse mit der Abgasnorm „EURO VI“, 37,91 Liter pro 100 km für Solobusse und 48,01 Liter pro 100 km für Gelenk-Hybridbusse angenommen. Für die Berechnung der NO_x- und PM-Emissionen der Diesel-Referenz wurden die Angaben und Ergebnisse entsprechend der HBEFA 4.1 [6] zugrunde gelegt, wobei die Emissionsfaktoren als Mittelwerte aus den Angaben für den innerörtlichen und den außerörtlichen Verkehr ermittelt wurden. Die verwendeten Emissionsfaktoren für Dieselbusse sind in Tabelle 14 dargestellt.

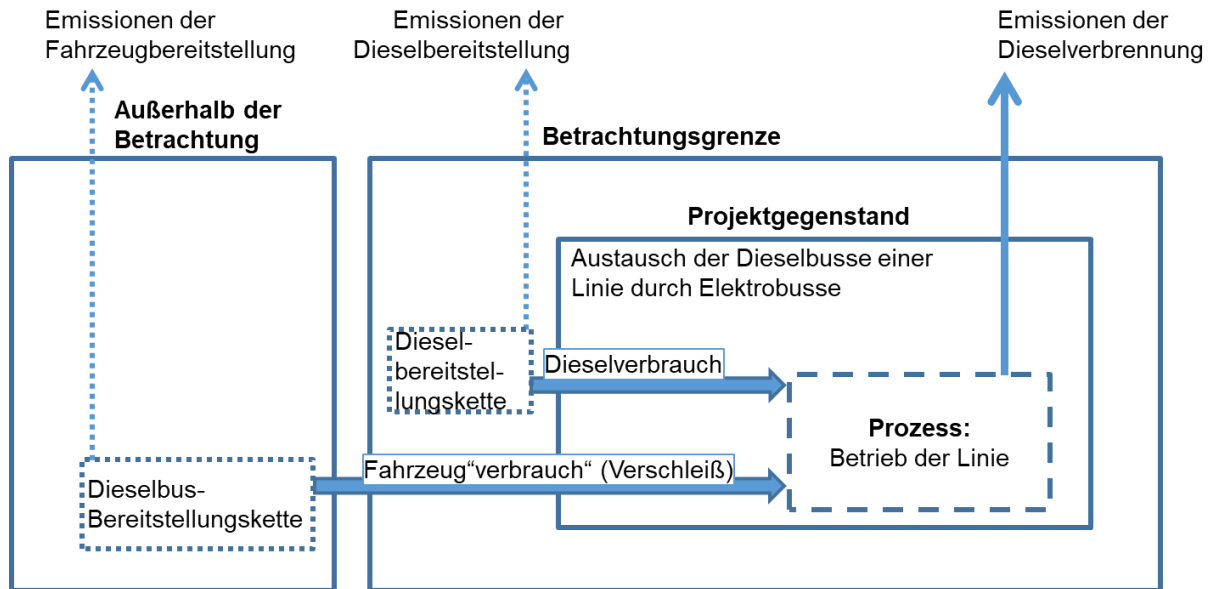
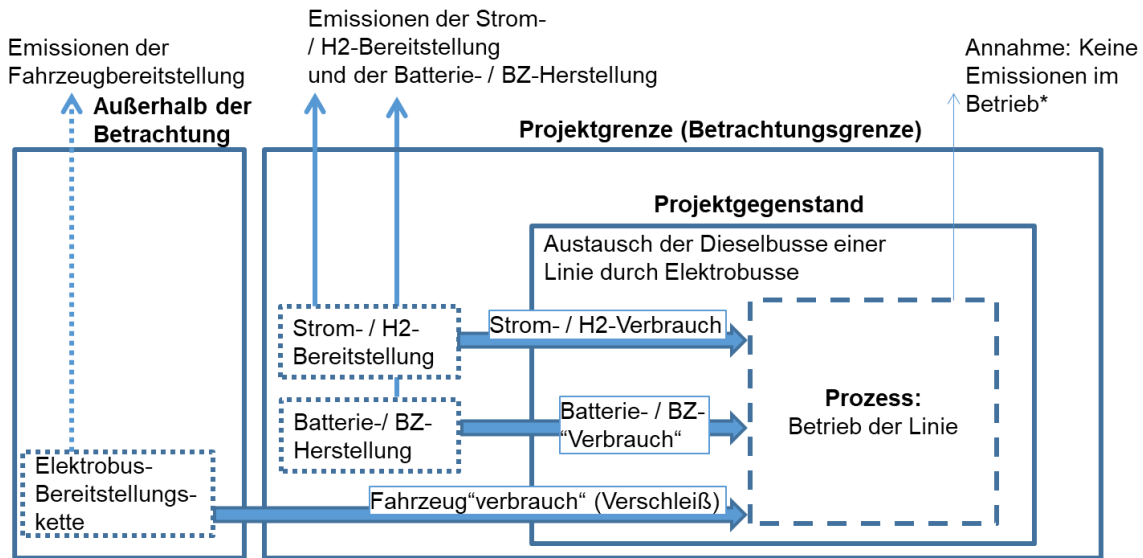


Abbildung 28: Rahmen der Ökobilanz eines Dieselbusses

| Emissionsfaktoren der Dieselbus-Referenz | Solobus | Gelenkbus |
|--|-----------------------------|-----------------------------|
| CO ₂ | 1,19 kgCO ₂ e/km | 1,52 kgCO ₂ e/km |
| NO _x | 0,25 g/km | 0,38 g/km |
| PM | 0,02 g/km | 0,03 g/km |

Tabelle 14: Emissionsfaktoren der Dieselbusreferenz

Der Betrachtungsrahmen der Umweltauswirkungen für Elektrobusse ist in Abbildung 29 dargestellt. Innerhalb der dargestellten Betrachtungsgrenze ist neben der Energiebereitstellung (Strom und Wasserstoff) auch die Herstellung des Batteriesystems sowie des Brennstoffzellensystems (inkl. eventuell notwendiger Ersatzsysteme) und der Wasserstofftanks enthalten. Es wurde ferner angenommen, dass durch den Fahrzeugbetrieb – abgesehen von den Emissionen der Brennstoffzusatzheizung, falls die jeweilige Fahrzeugkonfiguration diese enthält – keine Emissionen entstehen (bei Vernachlässigung des Reifen- und Bremsabriebs).



*Die Emissionen der Brennstoff-zusatzheizung werden jedoch berücksichtigt, falls diese bei dem jeweiligen Bustyp vorhanden ist.

Abbildung 29: Rahmen der Ökobilanz eines Elektrobusses

Für die Ermittlung der Emissionen aus der Strombereitstellung wurde angenommen, dass der Betrieb mit bilanziell klimaneutralem Ökostrom mit $0 \text{ gCO}_2\text{e/kWh}$ erfolgt. Für die Ermittlung der Emissionen aus der Wasserstoffherstellung wurde angenommen, dass der Betrieb mit bilanziell klimaneutralem „grünem Wasserstoff“ erfolgt, der mittels Elektrolyse und unter Verwendung von klimaneutralem Ökostrom hergestellt wird. Somit ergibt sich der Emissionsfaktor auch für „grünen Wasserstoff“ zu $0 \text{ gCO}_2\text{e/kgH}_2$.

Zur Ermittlung der Emissionen der Brennstoffzusatzheizung wurde ihr Betrieb mit Diesel angenommen. Die Außentemperatur, unterhalb welcher die Brennstoffzusatzheizung eingeschaltet wird, wurde zu 4 °C festgelegt. Zudem wurde das Temperaturprofil von Rüsselsheim mit der Verteilung der Stundendurchschnittstemperatur pro Jahr genutzt (s. Abbildung 6).

Schließlich wurden Annahmen zur Ermittlung der Emissionen aus der Herstellung der Batterie, der Brennstoffzelle und des Wasserstofftanks getroffen. Der Emissionsfaktor für die Batterieherstellung wurde der Studie „Lithium-Ion Vehicle Battery Production“ [7] entsprechend festgelegt, welche ein Update der viel beachteten schwedischen Studie vom IVL Swedish Environmental Research Institute aus dem Jahr 2017 darstellt. Die Studie gibt Emissionsfaktoren der Batterieherstellung an, normiert auf eine Batteriekapazität im Bereich von 61 bis $106 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$, wobei die Streuung vor allem auf die Variation des Strommixes für die Batteriezellenproduktion zurückzuführen ist. Der Emissionsfaktor an der oberen Bereichsgrenze ist, verglichen mit der vorherigen Studie aus Schweden, deutlich kleiner, was auf die Nutzung aktueller Daten zu Produktionsprozessen zurückzuführen ist. In der vorliegenden Studie wurde für den Emissionsfaktor der Batterieherstellung die obere Bereichsgrenze von $106 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$ als konservativer Wert angenommen. Die Herstellungsemissionen wurden auf die Batterielebensdauer umgelegt und auf diese Weise pro Jahr berechnet. Auch die Herstellungsemissionen von evtl. notwendigen Ersatzbatterien wurden berücksichtigt.

Für die Herstellung der Brennstoffzelle wurde ein auf die Leistung der Brennstoffzelle bezogener Emissionsfaktor von 30,5 kgCO₂e/kW angenommen. Dieser Wert entspricht dem Basisszenario der Studie „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km“ [8]. Der angenommene Emissionsfaktor für die Herstellung des Wasserstofftanks in Höhe von 470 kgCO₂e/kg stammt ebenfalls aus der genannten Studie und bezieht sich auf das Gewicht des Wasserstoffs, das im Tank speicherbar ist.

Die notwendigen Mengen des Diesels, Wasserstoffs und Stroms sowie die notwendigen Batteriekapazitäten wurden bei der technischen Machbarkeitsprüfung und der energiebasierten Umlaufplanung im AP 2 ermittelt. Sie wurden samt den oben definierten Emissionsfaktoren zur Quantifizierung der Umweltwirkung benutzt.

3.2.2 Ergebnisse

Abbildung 30 zeigt die jährlichen CO₂e-Emissionen der betrachteten Elektrobuskonfigurationen der Solobusse aus dem Betrieb sowie aus der Batterie- und Brennstoffzellenherstellung. Es ist erkennbar, dass durch den Betrieb mit Elektrobussen und durch die Verwendung des bilanziell klimaneutralen Stroms, je nach Bustyp, ca. 88 % der CO₂-Emissionen oder mehr eingespart werden können. Das Gleiche gilt für den Einsatz von klimaneutralem „grünem Wasserstoff“. Bei Bustypen mit Hybridheizung entstehen durch den Einsatz des Brennstoffzusatzheizers betriebliche Emissionen. Weil die Brennstoffzusatzheizung jedoch nur bei tiefen Temperaturen eingeschaltet wird, bleiben die CO₂-Emissionen von Bustypen, die mit Hybridheizung ausgestattet sind, vergleichsweise niedrig. Die Dieselreferenz beinhaltet hingegen sehr hohe Emissionswerte des Verbrennungsmotors.

Die NO_x- und PM-Emissionen sind von den Emissionsfaktoren für die Strom- und Wasserstoffbereitstellung unabhängig. Stattdessen kommen sie durch die Verwendung des Dieselmotors im Verbrennungsmotor des Dieselreferenzfahrzeugs bzw. im Brennstoffzusatzheizer der damit ausgestatteten Elektrobusse zustande. Somit weisen die Elektrobusse mit vollelektrischer Heizung keine NO_x- und PM-Emissionen im Betrieb auf (Abbildung 31). Auch bei den Bustypen mit Hybridheizung sind die NO_x- und PM-Emissionen deutlich niedriger als bei der Dieselreferenz. Bei NO_x-Emissionen besteht ein Einsparpotenzial von über 94 % und bei PM-Emissionen von über 80 %.

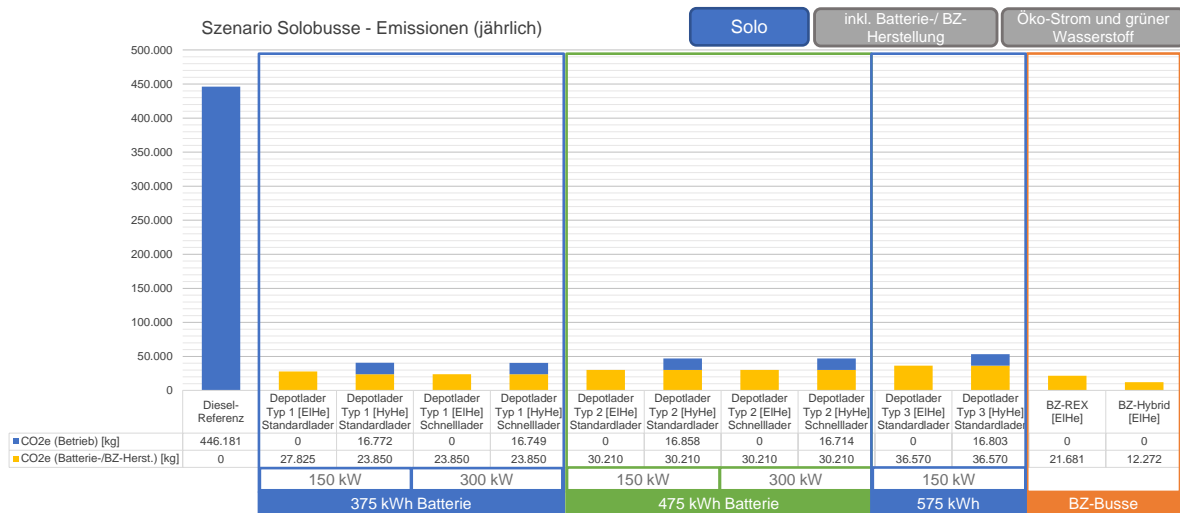


Abbildung 30: Jährliche CO₂-Emissionen der Solobusse

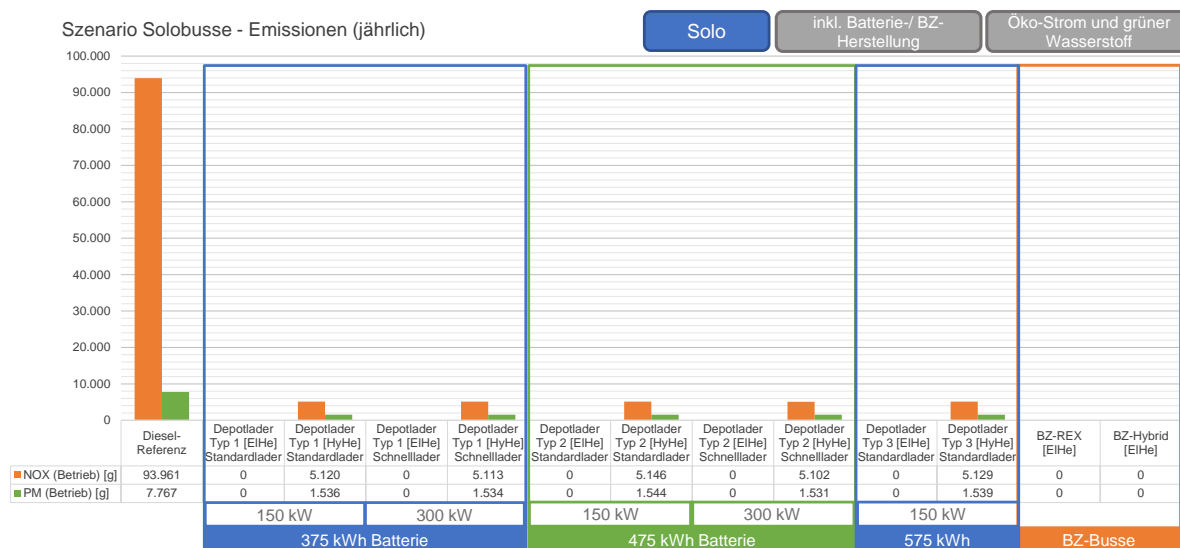


Abbildung 31: Jährliche NO_x- und PM-Emissionen der Solobusse

Die für Solobusse dargestellten Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Quantifizierung der Umweltwirkung gelten tendenziell auch für Gelenkbusse. Die detaillierten Ergebnisse für die Gelenkbusse sind im Anhang III dargestellt.

3.3 Fazit und Technologieempfehlung

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitspakete wurde den SWR ein Konzept mit Batteriebussen unter Einsatz der Hybridheizung und Depotladung empfohlen. Als Batteriekapazitäten erscheinen mind. 375 kWh für Solobusse und 500 kWh für Gelenkbusse empfehlenswert. Größere Batteriekapazitäten können zwar eine höhere Flexibilität im Betrieb bieten, verursachen jedoch höhere Gesamtkosten. Der Betrieb mit Hybridheizung ermöglicht den Einsatz von Fahrzeugen mit kleineren Batteriekapazitäten, die Vermeidung eines Fahr-

zeugmehrbedarfs und eine weniger aufwändige Systemauslegung. Darum sind die Gesamtkosten der Buskonzepte mit Hybridheizung ca. 6 % (bei Gelenkbussen) bis 8 % (bei Solobussen) günstiger als Konzepte mit vollelektrischer Heizung. Gleichzeitig ist auch bzgl. der CO₂e-, NO_x- und PM-Emissionen beim Einsatz einer Hybridheizung ein hohes Einsparpotential vorhanden.

Als Ladeleistung erweist sich, sowohl für Solo- als auch für Gelenkbusse, die Standardladung mit 150 kW als ausreichend. Diese Ladeleistung kann über Steckerladung realisiert werden. Die Schnellladung im Depot und die Gelegenheitsladung an der Endstelle „Rüsselsheim Bahnhof“ bieten beim Einsatz der Hybridheizung keine Vorteile bezüglich der Gesamtkosten. Bei Bedarf besteht auch bei Nutzung der Steckerladung die Möglichkeit, eine Nachladung an Endstellen zu realisieren. Zwar sind im Busbereich beim Einsatz von Steckerladung derzeit nur Ladeleistungen von 150 kW üblich, durch zukünftige Technologieentwicklungen werden aber wahrscheinlich auch höhere Leistungen durch Einsatz von Steckerladung mit gekühlten Kabeln realisierbar, wie sie im LKW-Bereich bereits demonstriert werden.

4. Umstellungsplanung

Auf Grundlage der Ergebnisse der Arbeitspakete 1 bis 3 und der daraus abgeleiteten Technologieempfehlung wurde in diesem Arbeitspaket eine Umstellungsplanung für die Busflotte der SWR erarbeitet. Unter Berücksichtigung der aktuellen Rahmenbedingungen und Anforderungen der SWR (Kapitel 4.1) wurde ein Handlungsleitfaden zum schrittweisen Austausch der Busse und zum Aufbau der Ladeinfrastruktur im Betriebshof erstellt (Kapitel 4.2 und 4.3). Abschließend wurden eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bezüglich der für die ersten Batteriebusse notwendigen Investitionen und der jährlichen Mehrkosten sowie eine Analyse des Umweltnutzens der Umstellung auf Batteriebusse durchgeführt (Kapitel 4.4).

4.1 Anforderungen und Rahmenbedingungen

Bei der Konzeptionierung der Umstellung auf Elektrobusse wurden die aktuellen Anforderungen und Rahmenbedingungen der SWR berücksichtigt. Zur Erarbeitung des Austauschplans der Busflotte wurden die Beschaffungsplanung der SWR sowie die aktuelle Fuhrparkliste analysiert. Die Beschaffungsplanung sieht vor, maximal 2 Busse pro Jahr auszutauschen. Ausgehend von den Baujahren der Fahrzeuge laut Fuhrparkliste und der Annahme einer minimalen Nutzungsdauer von 12 Jahren, wurde ein Austauschplan der Flotte bis zum Jahr 2037 erstellt.

Die aktuelle Beschaffungsplanung der SWR sieht ferner die Beschaffung von 4 Dieselhybrid-Gelenkbussen in den Jahren 2023 und 2024 vor. Diese werden als Ersatz für 4 Erdgas-Gelenkbusse beschafft. Nach Ausmusterung dieser Busse wird die Flotte der SWR keine Erdgasbusse, sondern ausschließlich Dieselbusse enthalten. Zu diesem Zeitpunkt ist der Rückbau der Erdgastankstelle geplant. Sie befindet sich auf dem Gelände des Betriebshofs der SWR (siehe Abbildung 12). Die durch den Rückbau freiwerdende Fläche könnte als potenzielle Fläche für den Aufbau der Ladeinfrastruktur zur Verfügung stehen.

4.2 Handlungsleitfaden Austausch der Busse

Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen der SWR und auf Grundlage der Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete wurde der in Abbildung 32 dargestellte Austauschplan für die Busflotte der SWR erstellt. Entsprechend der Technologieempfehlung, wurde die Beschaffung von Batteriebussen mit mind. 375 kWh Batteriekapazität für Solobusse und mind. 500 kWh Batteriekapazität für Gelenkbusse, mit einer Hybridheizung und mit 150 kW Steckerladung im Depot unterstellt. Mit diesem Buskonzept können die Dieselbusse ohne Fahrzeugmehrbedarf durch Batteriebusse ersetzt werden, sodass die Summe der Fahrzeuge nach vollständigem Austausch der Flotte unverändert bleibt. Der Abschluss der Flottenumstellung erfolgt, unter Berücksichtigung der Beschaffungsplanung der SWR von max. 2 Bussen pro Jahr, bis zum Jahr 2037.

| | (2023) | (2024) | 2025 | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 | SUMME |
|------------------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Solobus | | | | 2 | 2 | | | 2 | 1 | | | | | | | 7 |
| Gelenkbus | (2) | (2) | 2 | | | 2 | 2 | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 18 |
| SUMME | (2) | (2) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 25 |

Abbildung 32: Handlungsleitfaden für den Austausch der Busse

Da eine zeitnahe Ausmusterung der Erdgasbusse und der Rückbau der Erdgastankstelle geplant sind, sieht die Beschaffungsplanung der SWR vor, in den Jahren 2023 und 2024 vorerst Diesel-Hybridbusse als Ersatz für Erdgasbusse zu beschaffen. Ein empfehlenswerter Startzeitpunkt für die ersten Batteriebusse liegt im Jahr 2025. Bis zu diesem Zeitpunkt ist eine ca. 2-jährige Phase zur Vorbereitung des Betriebsstarts der ersten Batteriebusse einzurechnen, die im Folgenden detaillierter beschrieben wird. Anschließend werden nahezu jährlich max. 2 Dieselbusse durch Batteriebusse pro Jahr ausgetauscht. So werden die Batteriebusse in kleineren Schritten in den Betrieb eingeführt und es können sukzessiv Erfahrungen zum Thema Elektromobilität aufgebaut werden. Um bessere Verhandlungspositionen zu erzielen, ist es auch denkbar, die Beschaffungen mehreren Jahren zu größeren Beschaffungen von über 2 Bussen zusammenzufassen. So kann z.B. die Beschaffung eines Solobusses für das Jahr 2031 mit der Beschaffung für das Jahr 2030 zusammengelegt werden. Die vorgegebenen CVD-Quoten werden durch den aufgezeigten Handlungsleitfaden und die Beschaffung von ausschließlich Batteriebussen erfüllt.

Damit der Betrieb der ersten Batteriebusse im Jahr 2025 erfolgen kann, sind entsprechende Vorbereitungen notwendig. Sie sind im Handlungsleitfaden für die Beschaffung der ersten Batteriebusse in Abbildung 33 dargestellt. Im 1. Halbjahr 2023 könnte die Entscheidung für eine Batteriebusstechnologie getroffen werden. Ab diesem Zeitpunkt dauert es ca. 2-3 Jahre, bis die ersten Batteriebusse in den Betrieb gehen können. Als Folgeschritt zur Technologieentscheidung könnten die Fördermittel für das Vorhaben akquiriert werden. Als mögliche Fördergeber könnten BMDV mit 80 % Förderung der Fahrzeugmehrkosten und die Förderung des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Wohnen in Frage kommen. Die Letztere könnte bis zu 40 % der Kosten für die Ladeinfrastruktur, bis zu 100.000 € für den Netzananschluss sowie bis zu 40 % der Kosten für die Werkstattausstattung und Schulungen fördern. Die Ausschreibung sollte ebenfalls im 2. Halbjahr 2023 (evtl. unter Vorbehalt der Fördermittel) starten, sodass die Zuschlagserteilung im 1. Halbjahr 2024 läge. Die Lieferung der Fahrzeuge wäre damit voraussichtlich im 2. Halbjahr 2025 einzuplanen. Parallel dazu sollten die Errichtung der Ladeinfrastruktur und die Ertüchtigung der Werkstatt durchgeführt werden.

Im ersten Ausbauschnitt der Ladeinfrastruktur wird empfohlen, den Netzanschluss mit der maximal verfügbaren Anschlussleistung von 2.000 kW zu errichten. Abbildung 35 zeigt das netzseitige effektive Ladeleistungsprofil für den Netzanschluss des Betriebshofs bei vollständiger Umstellung auf Batteriebusse, d.h. – entsprechend den Ergebnissen der energiebasierten Umlaufplanung (siehe Kapitel 2.3.2) – bei Betrieb mit 20 Bussen. Abgebildet sind der Worst Case des Energieverbrauchs sowie ein ungesteuertes Ladeverhalten, bei welchem jeder Bus direkt nach Ankunft im Betriebshof mit dem Ladevorgang beginnt. Um die Ladeleistungsspitzen abzubilden, wurde auf die max. Ladeleistung im gezeigten Profil ein Puffer von 25 % aufgeschlagen. Somit ergibt sich die Spitzenleistung in diesem Fall zu rund 1.450 kW. Dementsprechend kann die verbleibende Anschlussleistung des 2.000 kW Netzanschlusses als Reserveleistung – z.B. zur weiteren betrieblichen Flexibilität oder zur Flottenerweiterung – genutzt werden. Ferner können durch den Einsatz des gesteuerten Ladens und der Lastspitzenglättung weitere Potenziale erschlossen werden.

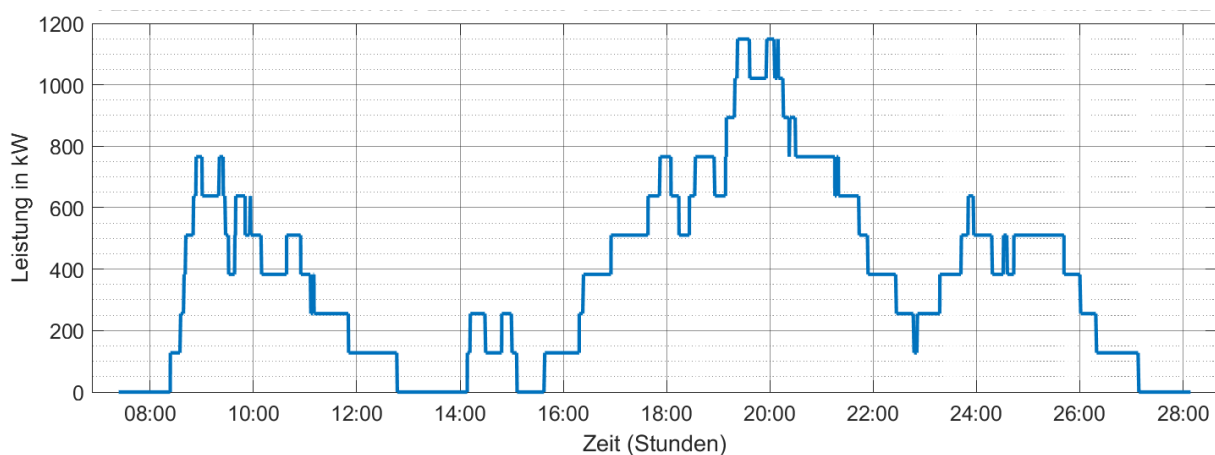


Abbildung 35: Netzseitiges Ladeleistungsprofil für den Betriebshof bei ungesteuertem Laden nach vollständiger Umstellung auf Batteriebusse (Betrieb mit 20 Fahrzeugen)

Als potenzieller Standort für den Netzanschluss und die Stromversorgungsinfrastruktur bietet sich der aktuelle Standort der zurückzubauenden Erdgastankstelle an (siehe Abbildung 36). Nach Angaben der SWR könnte der Anschluss durch Stichleitung an das Mittelspannungsnetz unterhalb der Walter-Flex-Straße erfolgen. Die Errichtung der Ladegeräte könnte ebenfalls auf der Fläche der Erdgastankstelle oder direkt in der Abstellhalle in unmittelbarer Nähe der Busse erfolgen. Bushalle 2 (in der Abbildung im südlichen Teil der Busabstellung) bietet die Möglichkeit, Ladegeräte an der inneren Hallenwand unterzubringen. Ein Vorteil dieser Unterbringung der Ladegeräte sind die kürzeren Kabelwege auf der Gleichspannungsseite. Als Nachteil kann jedoch der Platzbedarf der Ladegeräte in der Halle angesehen werden.



Abbildung 36: Potenzieller Standort für die Ladeinfrastruktur

4.4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Umweltnutzen

Nach dem erstellten Handlungsleitfaden zum Austausch der Busse und zum Aufbau der Ladeinfrastruktur sollen die ersten Batteriebusse im Jahr 2025 in Betrieb genommen werden. Tabelle 15 zeigt die Investitionen, die für die Beschaffung der Batteriebusse und für den Aufbau der Ladeinfrastruktur anfallen. Den größten Anteil der Investitionen macht, mit rund 1,46 Mio. €, die Beschaffung der ersten beiden Batterie-Gelenkbusse aus. Durch Berücksichtigung einer potenziellen Förderung der Fahrzeugmehrkosten der Batteriebusse gegenüber Dieselnissen kann die Investition in die Fahrzeugbeschaffung um bis zu ca. 40 % reduziert werden. Der erste Ausbauschritt der Ladeinfrastruktur, bestehend aus 5 Ladegeräten, Transformatorhaus und Netzanschluss, erfordert dagegen, mit insgesamt 968 Tsd. €, geringere Investitionen als die Fahrzeugbeschaffung. Auch die elektrobuspezifischen Ertüchtigungen der Werkstatt (vor allem die Investitionen in den Dacharbeitstand) wurden in den Investitionen berücksichtigt (vgl. Tabelle 15). Die Gesamtsumme der Investitionen für die Inbetriebnahme der Batteriebusse im Jahr 2025 beträgt somit rund 2,7 Mio. €. Dieser Betrag kann bei Berücksichtigung entsprechender Fördermöglichkeiten um bis zu ca. 40 % auf ca. 1,67 Mio. € reduziert werden.

| | Investitionen ohne Förderung | Investitionen mit Förderung | |
|--|---------------------------------|---|---|
| Erste Batteriebusse | 1.460 T€ | 1.186 T€ | 911 T€ |
| 2 Gelenkbusse à 730 T€ | | inkl. Förderung von 40 % Fahrzeugmehrkosten | inkl. Förderung von 80 % Fahrzeugmehrkosten |
| Erster Ausbauschritt der Ladeinfrastruktur | | | |
| Ladegeräte und Stromversorgungsinfrastruktur: | 648 T€ | 389 T€ | 389 T€ |
| 5 x 150 kW Ladegeräte à 95 T€: 475 T€ | | inkl. 40 % Förderung | inkl. 40 % Förderung |
| Transformatorhaus mit 1 x 1.000 kW Trafo: 173 T€ | | | |
| 2.000 kW Netzanschluss: | 320 T€ | 220 T€ | 220 T€ |
| Baukostenzuschuss 101,11 €/kW | | inkl. 100 T€ Förderung | inkl. 100 T€ Förderung |
| Anschlusskostenbeitrag 117,6 T€ | | | |
| Sonstige Infrastruktur | | | |
| Ertüchtigung Werkstatt (Dacharbeitsstand, weitere Werkzeuge) | 250 T€ | 150 T€ | 150 T€ |
| | | inkl. 40 % Förderung | inkl. 40 % Förderung |
| SUMME | 2.678 T€ | 1.944 T€ | 1.670 T€ |

Tabelle 15: Investitionen für Start der Batteriebusse im Jahr 2025

Neben den zum Start des Batteriebusbetriebs notwendigen Investitionen wurden im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auch die jährlichen Mehrkosten durch die Einführung der Batteriebusse gegenüber einem Weiterbetrieb mit Dieselbussen untersucht. Abbildung 37 zeigt die jährlichen Mehrkosten der Umstellung auf Batteriebusse, wobei die Kapital- und Betriebskosten der Batterie- und Dieselbusse berücksichtigt wurden. Durch den stetigen Austausch der Dieselbusse durch Batteriebusse (entsprechend Handlungsleitfaden) steigen die jährlichen Mehrkosten. Hierbei wurden die potenziellen Förderungen der Batteriebusse und Ladeinfrastruktur nur für den Vorhabenbeginn im Jahr 2025 berücksichtigt, da sich die Förderkulisse in den kommenden Jahren evtl. ändern kann.

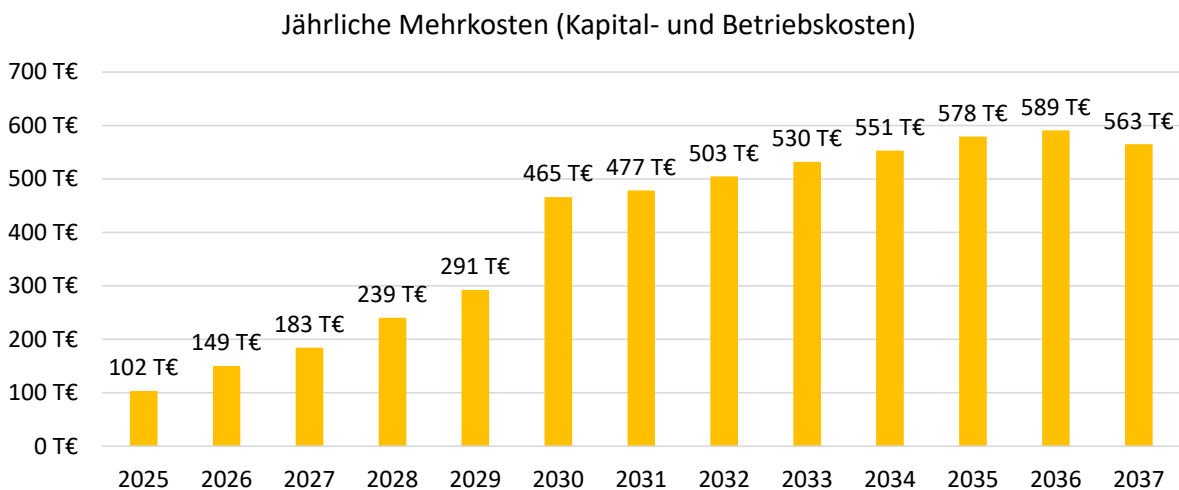


Abbildung 37: Jährliche Mehrkosten der Umstellung auf Batteriebusse gegenüber der Diesel-Referenz

Die Mehrkosten durch die Umstellung auf Batteriebusse liegen, den Ergebnissen in Abbildung 37 entsprechend, im Bereich von 6 % bis 19 % der Gesamtkosten. Im Jahr 2030 ist durch die zweite Ausbaustufe der Ladeinfrastruktur, bei der Investitionen in 8 weitere Ladegeräte und

Stromversorgungsinfrastruktur anfallen, ein deutlicher Anstieg der Mehrkosten zu erwarten. Mit den in AP 3 angenommenen Preissteigerungen für Diesel und Strom sind die Mehrkosten der Batteriebusse jedoch rückläufig, wie der Vergleich zwischen den Mehrkosten in Jahren 2036 und 2037 zeigt.

Den Mehrkosten der Umstellung auf Batteriebusse steht eine positive Umweltwirkung gegenüber. So zeigt Abbildung 38 den Umweltnutzen des Vorhabens. Dargestellt sind die eingesparten CO₂e-Emissionen durch den Ersatz der Dieselbusse über den Zeitraum der Flottenumstellung. Hierbei wurde nach der gleichen Methodik wie im AP 3 (Kapitel 3.2.1) vorgegangen und der Betrieb der Batteriebusse mit bilanziell klimaneutralem Strom angenommen. Durch die schrittweise Einführung der Batteriebusse (entsprechend Handlungsleitfaden) sinken die CO₂e-Emissionen der Flotte kontinuierlich. Nach vollständiger Umstellung im Jahr 2037 reduzieren sich die CO₂e-Emissionen im Vergleich zur Diesel-Referenz um ca. 90 %. Die verbleibenden Emissionen sind auf den Einsatz der Hybridheizung sowie auf den ökologischen Fußabdruck der Batterieherstellung zurückzuführen.

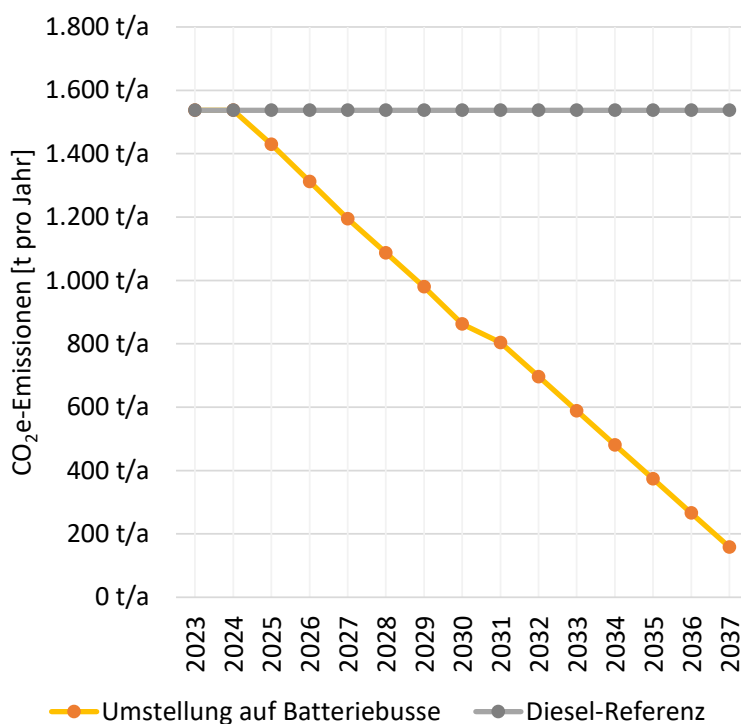


Abbildung 38: CO₂e-Emissionen der SWR-Fahrleistung

Literaturverzeichnis

- [1] e-mobil BW GmbH, Fraunhofer ISE, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg, „Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität - Entwicklungsstand und Forschungsbedarf,“ 2012.
- [2] B. D. Reuter, M. D. Faltanbacher, O. D. Schuller, N. Whitehouse und S. Whitehouse, „New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots,“ 2017.
- [3] N. Natesan, „Enabling Fuel Cell Bus Deployment - Technology from Linde,“ 2016.
- [4] VGB, „Elektromobilität - Arbeiten an Omnibussen mit Hochvolt-Systemen,“ 2016.
- [5] „EN 16258 Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers),“ 2012.
- [6] „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs HBEFA 4.1,“ August 2019.
- [7] E. Emilsson und L. Dahllöf, „Lithium-Ion Vehicle Battery Production,“ IVL Swedish Environmental Research Institute, 2019.
- [8] A. Sternberg, C. Hank und C. Hebling, „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km,“ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2019.
- [9] NOW GmbH, „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV,“ 2019.
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Bekanntmachung zur Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung,“ 2019.
- [11] Infrac, „Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs,“ 2019.
- [12] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE , „Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km - Studie im Auftrag der H2 Mobility,“ 2019.
- [13] IVL Swedish Environmental Research Institute, „Lithium-Ion Vehicle Battery Production,“ 2019.
- [14] Statista, „Höhe der CO2-Emissionen durch Stromerzeugung in der EU nach Ländern im Jahr 2016,“ 2020.
- [15] Agora Verkehrswende, „Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen,“ 2019.
- [16] Umweltbundesamt, „Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, Climate Change 37/2019,“ 2019.
- [17] Pütz, Prof. Dr. Ralph, „On-Board-Vermessung von EURO-VI-Linienbussen im Realbetrieb: Vergleich von Mercedes Benz-Diesel-, Volvo-Diesel-Hybrid- und MAN-CNG-Solobussen auf drei repräsentativen Linien der T.I.C.E. in Esch/Luxemburg,“ 2014.

Anhang I

| Ausrüstung | Mindestanzahl nach VDV 825 (ohne Bezug zu Flottengröße) | Kosten pro Stück | Quelle für Kosten und Kommentar | Anzahl pro 50 Busse Empfehlung bzw. Schätzung | Kosten pro Bus | Notizen zur SWR-Ausstattung |
|--|---|---|--|--|----------------|---|
| Prüfbox für HV-System | 1 | 22.000 € | Angebote und weitere Informationen von Buserstellern (Anmerkungen: Diagnoseeinheit mind. 1 für jeden Elektrobustyp, besser: je 2) | 2 | 880 € | |
| HV-Spezialwerkzeugsatz | 2 | | | | | |
| Spannungsprüfer | 2 | | | | | |
| Messgeräte | 1 | | | | | |
| Diagnoseeinheit (Laptop inklusive fahrzeugspezifische Software) | 1 | | | | | |
| Schutzausrüstung Mitarbeiter (EN 1149) | 2 | 2.000 € | Schätzung (Anmerkung: mind. 1 für jede Person pro Arbeitsschicht, zzgl. Reserve) | 5 | 200 € | |
| Transporthilfen (z.B. für Batterien) | 1 | 3.000 € | Schätzung | 1 | 60 € | |
| Kran und/oder Gabelstapler (Hublast min. 1,0 t zur Demontage des Traktionsmotors) | 1 | in Preis für Dacharbeitsstand enthalten | siehe Dacharbeitsstand (fest montiert) | 2 | - € | |
| Anschlagmittel (Ketten, Haken) | 1 | in Preis für Dacharbeitsstand enthalten | siehe Dacharbeitsstand (fest montiert) | 2 | - € | |
| Dacharbeitsstand (fest montiert, beidseitig begehbar, inkl. Kran), inkl. Installation | 1 | 170.000 € | Verkehrsunternehmen: > 700.000 € (dabei Installation inklusive), in Zukunft aber weniger erwartet. Angebot von Anbieter: knapp 200.000 € (inkl. Kran, ohne Installation) | 2 | 6.800 € | Fest montierter Dacharbeitsstand nötig, aber Kran nicht notwendig |
| Dacharbeitsstand (mobiles Gerüst) | 1 | 50.000 € | Aussage verschiedener Verkehrsbetriebe | 0 | 0 € | vorhanden |
| Arbeitsgrube | 1 | 80.000 € | Schätzung | 0 | 0 € | vorhanden |
| Hebestand | k.A. | 250.000 € | Verkehrsunternehmen: ca. 150.000 € für Hebestand, in Summe inklusive Installation / Integration in Werkstatt: ca. 250.000 € | 0 | 0 € | vorhanden |
| Nur für BZ-Hybridbusse und Batteriebusse mit BZ-Range Extender: Ertüchtigung Abstellhalle und Werkstatt für H2 | k.A. | 200.000 € | Schätzung. Detektion von kritischen H2-Konzentrationen und automatische Entlüftung. | 0,5 | 2.000 € | |

Tabelle 16: Investitionsbedarf in die Werkstattausrüstung

Anhang II

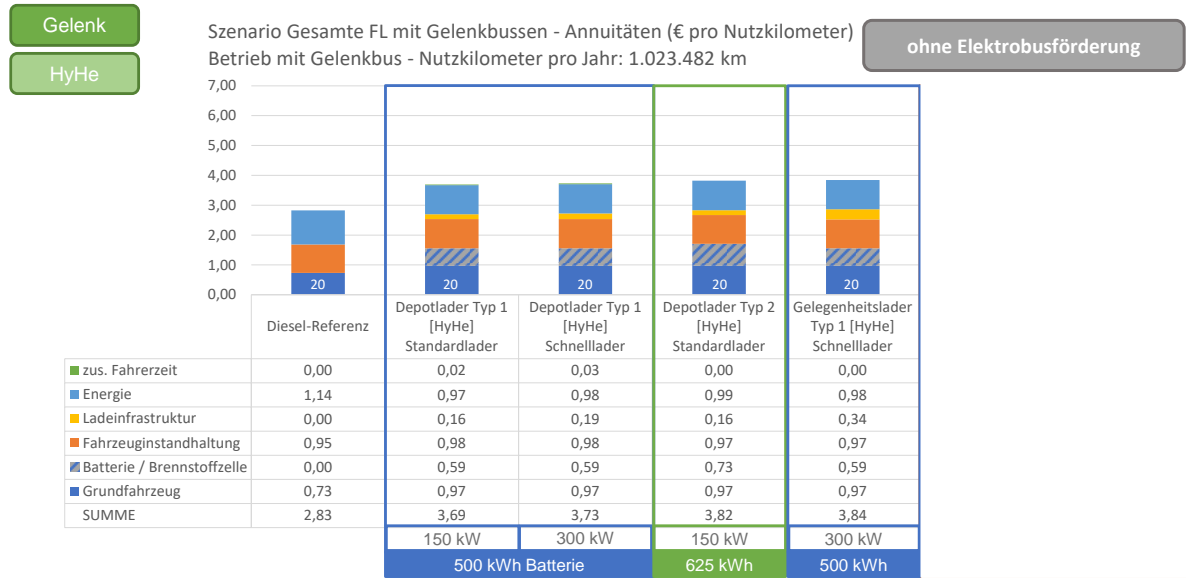


Abbildung 39: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Gelenkbuskonzepte mit Hybridheizung im Szenario „Gesamte Fahrleistung mit Gelenkbussen“

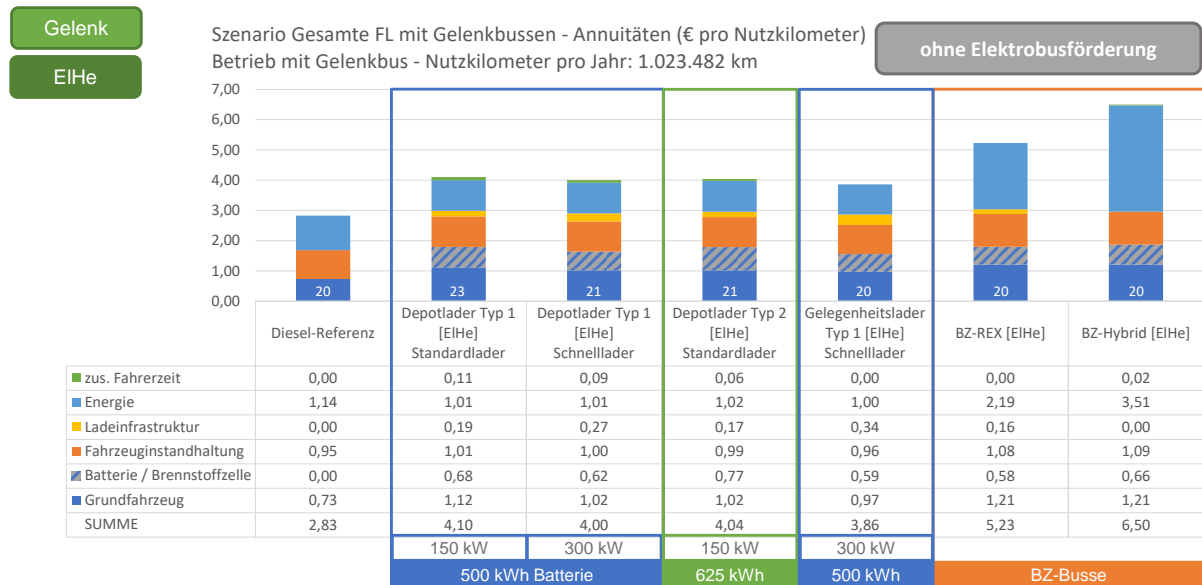


Abbildung 40: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Solobuskonzepte mit Hybridheizung im Szenario „Gesamte Fahrleistung mit Gelenkbussen“

Anhang III

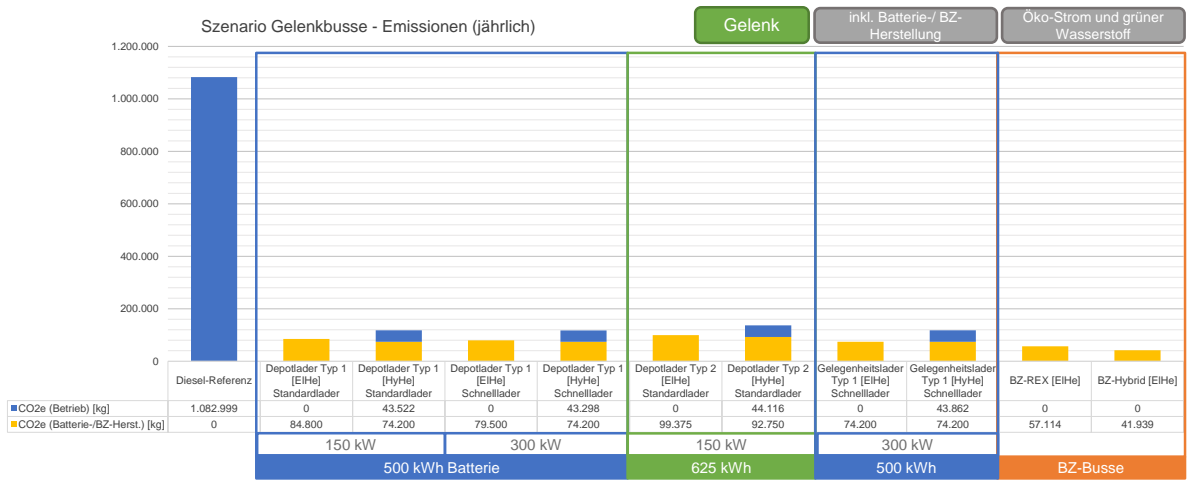


Abbildung 41: Jährliche CO₂-Emissionen der Gelenkbusse

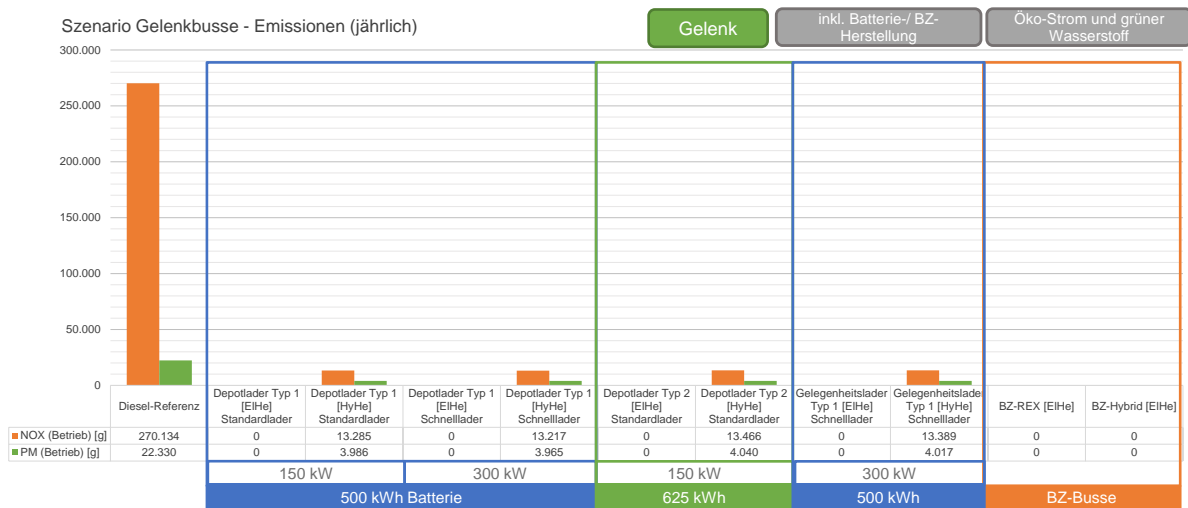


Abbildung 42: Jährliche NO_x- und PM-Emissionen der Gelenkbusse